

ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS  
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

DANIELLI CECIM DA SILVA TONON

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DOS CONCRETOS COMPOSTOS COM  
AGREGADOS GRAÚDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM DIFERENTES TEORES DE  
SUBSTITUIÇÃO**

Porto Alegre  
2020

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DOS CONCRETOS  
COMPOSTOS COM AGREGADOS GRAÚDOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO EM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO**

**DANIELLI CECIM DA SILVA TONON**  
ENGENHEIRA CIVIL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA  
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**  
**Março, 2020**



# **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DOS CONCRETOS COMPOSTOS COM AGREGADOS GRAÚDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO**

**DANIELLI CECIM DA SILVA TONON**

ENGENHEIRA CIVIL

ORIENTADOR: DR(a). MARCUS SEFERIN

CO-ORIENTADOR: DR(a). JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA ANDRADE

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Março, 2020**

## Ficha Catalográfica

T666a Tonon, Danielli Cecim da Silva

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos concretos compostos com agregados graúdos de construção e demolição em diferentes teores de substituição / Danielli Cecim da Silva Tonon . – 2020.

92 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Seferin.

Co-orientador: Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Resíduo de Construção e Demolição. 3. Impacto Ambiental. 4. Análise de Sensibilidade. 5. Concreto. I. Seferin, Marcus. II. Andrade, Jairo José de Oliveira. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

## **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DOS CONCRETOS COMPOSTOS COM AGREGADOS GRAÚDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO**

**CANDIDATA: DANIELLI CECIM DA SILVA TONON**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

**DR. MARCUS SEFERIN - ORIENTADOR**

**DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - COORIENTADOR**

**BANCA EXAMINADORA**

**DR. ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN - FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DE  
BLUMENAU**

**DRA. BERENICE A. DEDAUID - DO PG/ETEMA/ESCOLA POLITÉCNICA - PUCRS**

**PUCRS**

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br

www.pucrs.br/politecnica

*“Suba o primeiro degrau com fé.  
Não é necessário que você veja  
toda a escada. Apenas dê o  
primeiro passo”*

*(Martin Luther King)*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Cleidinei Augusto da Silva e Regina Célia Cecim da Silva que sempre me deram todo apoio necessário.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro agradeço a Deus pela minha vida, por sempre estar no meu caminho, me iluminando e me guiando.

Aos meus pais Cleidinei Augusto da Silva e Regina C. Cecim da Silva, à minha irmã Letícia Cecim da Silva e ao meu marido Raphael de S. C. Tonon por serem a base de tudo para mim, que sempre me apoiaram dia após dia com orientações, compreensão, amor, sacrifícios e principalmente por sempre me incentivarem a dar continuidade aos meus sonhos.

Aos Professores Dr. Jairo José de Oliveira Andrade e Dr. Marcus Seferin pela orientação, pelos conhecimentos e disponibilidade em todos os momentos em que precisei.

À Iasmíny Borba da Cunha, minha companheira de turma, por estar me ajudando e me dando o apoio necessário.

À CAPES e à PUCRS pela bolsa de estudo e a infraestrutura disponível. E aos demais familiares e amigos que direta ou indiretamente participaram dessa conquista. À todos minha sincera gratidão.



## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>7</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>8</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>15</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>18</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>19</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>26</b>
2.1. Objetivo Geral.....	26
2.2. Objetivos Específicos .....	26
2.3. Delimitação da Pesquisa .....	27
2.4. Estrutura da Pesquisa .....	27
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>28</b>
3.1. Resíduo de Construção e Demolição (RCD).....	28
3.2. Avaliação de Ciclo de Vida .....	30
3.2.1. Definição do objetivo e escopo .....	36
3.2.2. Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	36
3.2.3. Avaliação de Impacto Ambiental do Ciclo de Vida (AICV).....	38
3.2.4. Interpretação dos Resultados .....	39
3.3. Histórico de Avaliação do Ciclo de Vida de Concretos .....	40
3.4. Outras Pesquisas Relacioandas ao Tema .....	48
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
4.1. Objetivo e Escopo .....	51
4.2. Fronteiras do Sistema.....	52
4.3. Tipos de cenários e transporte .....	54

4.4. Materiais empregados para confecção dos concretos.....	55
4.5. Procedimentos de dosagem .....	57
4.6. Metodologia de Avaliação dos Impactos Ambientais .....	59
4.7. Análise do inventário do ciclo de vida (ICV) .....	60
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
5.1. Análise de avaliação ambiental para o cenário 1 .....	64
5.2. Avaliação de contribuição dos materiais constituintes na categoria de mudanças climáticas .....	73
5.3. Análise de avaliação ambiental para o cenário 2 e 3 .....	79
5.3.1. Análise de sensibilidade .....	79
5.3.2. Distâncias Máximas .....	80
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>84</b>
6.1. Sugestões para trabalhos futuros .....	85
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução temporal da literatura relacionada à ACV do RCD.....	24
Figura 1.2 - Estratégias aplicadas para gestão de RCD .....	25
Figura 3.1 - Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida .....	32
Figura 3.2 - Estágios do Ciclo de Vida do produto .....	34
Figura 3.3 - Trabalhos acadêmicos com temas de ACV. ....	35
Figura 3.4 - Dissertações e teses com temas de ACV defendidas por ano no Brasil.	35
Figura 3.5 - Abordagens do ponto médio e do ponto final .....	39
Figura 3.6 - Impactos ambientais das diferentes fases do ciclo de vida de NAC e RAC.....	42
Figura 3.7 - Análise de contribuição dos impactos associados ao gerenciamento de RCD .....	45
Figura 3.8 - Avaliação ambiental das amostras de concreto de 20 mm.....	47
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa .....	52
Figura 4.2 - Fronteira do sistema do produto .....	53
Figura 4.3 - Mapa das distâncias dos cenários 1, 2 e 3. ....	54
Figura 4.4 - Curva Granulométrica do agregado graúdo e do RCD (a), e do agregado miúdo (b). ....	56
Figura 4.5 - Porcentagem da quantidade de materiais no agregado reciclado. ....	57
Figura 5.1 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de depleção abiótica (a) e depleção abiótica (combustível fóssil) (b) – cenário 1. ....	65
Figura 5.2 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de mudanças climáticas – cenário 1. ....	66
Figura 5.3 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de depleção de ozônio estratosférico – cenário 1. ....	67

Figura 5.4 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de toxicidade humana – cenário 1. ....	68
Figura 5.5 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de ecotoxicidade de água doce (a), marinha (b) e terrestre (c) – cenário 1.	69
Figura 5.6 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de oxidação fotoquímica – cenário 1.....	70
Figura 5.7 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de acidificação – cenário 1.....	71
Figura 5.8 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de eutrofização – cenário 1.....	71
Figura 5.9 - Comparação da ACV das amostras de concretos – cenário 1. ....	73
Figura 5.10 - Diagrama de processo da amostra CR.....	74
Figura 5.11 - Diagrama de processo da amostra CRCD25.....	75
Figura 5.12 - Diagrama de processo da amostra CRCD50.....	76
Figura 5.13 - Diagrama de processo da amostra CRCD75.....	77
Figura 5.14 - Diagrama de processo da amostra CRCD100.....	78
Figura 5.15 - Comparação da ACV das amostras de concretos – cenário 2 e 3. ....	82
Figura 5.16 - Comparação da ACV das amostras de concretos – cenário 1, 2 e 3. ....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resultado dos impactos ambientais dos concretos utilizando a metodologia da ACV. ....	40
Tabela 3.2 - Impactos Ambientais gerais referentes a 1 tonelada de RCD. ....	44
Tabela 4.1 – Distâncias dos cenário 1, 2 e 3. ....	54
Tabela 4.2 - Massas específicas e unitárias dos materiais empregados. ....	55
Tabela 4.4 – Tabela de dosagem para produzir 1 m <sup>3</sup> de concreto com 32 MPa. ....	58
Tabela 4.5 - Distância em t×km dos materias para as amostras de concreto nos cenário 1, 2 e 3. ....	62
Tabela 5.1 - Resultados da avaliação de impacto ambiental das amostras de concreto – cenário 1.....	64
Tabela 5.2 – Resultados da avaliação de impacto ambiental das amostras de concreto – cenário 2 e 3.....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Pesquisas e resultados relacionados à ACV. ....	21
Quadro 3.1 - Pesquisas e objetivos relacionados à ACV. ....	48
Quadro 4.1 - Impactos adotados pela CML, versão <i>baseline</i> . ....	59
Quadro 4.2 - Processos implementados no SimaPro 9.0 para modelar o cimento, extração natural de matéria-prima, agregado de concreto reciclado e concreto – cenário 1, 2 e 3. ....	61
Quadro 4.3 - Tipos de transportes implementados para a modelagem da ACV. ....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ADP	Depleção de recursos abióticos (Abiotic Resource Depletion)
ADP-ff	Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis (Abiotic Resource Depletion – fossil fuels)
AICV	Avaliação de Impacto Ambiental do Ciclo de Vida
AP	Potencial de Acidificação (Acidification Potential)
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CML	Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CR	Concreto de Referência
CRCD25	Concreto com substituição do agregado natural por 25% de RCD
CRCD25 -500km	Concreto com substituição do agregado natural por 25% de RCD com 500km de distância de transporte
CRCD50	Concreto com substituição do agregado natural por 50% de RCD
CRCD50 -180km	Concreto com substituição do agregado natural por 25% de RCD com 180km de distância de transporte
CRCD75	Concreto com substituição do agregado natural por 75% de RCD
CRCD100	Concreto com substituição do agregado natural por 100% de RCD
D <sub>máx</sub>	Diâmetro Máximo
EP	Potencial de Eutrofização (Eutrophication Potential)
FAETP	Ecotoxicidade em Água Doce (Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential)
GWP	Mudanças Climáticas (Global Warming Potential)
HTP	Toxicidade Humana (Human Toxicity)
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
ISO	Organização Internacional de Normalização

MAETP	Ecotoxicidade Marinha (Marine Aquatic Ecotoxicity Potential)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
ODP	Depleção de ozônio estratosférico (Ozone Layer Depletion Potential)
POCP	Oxidação Fotoquímica (Photochemical Ozone Creation Potential)
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SSA	Cinza de logo de esgoto (Sewage Sludge Ash)
TETP	Ecotoxicidade Terrestre (Terrestrial Ecotoxicity Potential)
UF	Unidade Funcional

## SIGLAS

°C	Graus Celsius
CFC-11	Clorofluorcarboneto
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno
Fck	<i>Feature Compression Know</i>
Kg	Quilograma
MJ	Megajoule
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Fosfato
Sb	Antimônio
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
tCO <sub>2e</sub>	Toneladas de gás carbônico equivalente
hab	Habitante
l	Litro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
n°	Número
t	Tonelada

## SÍMBOLOS



×	Multiplicação
/	Por
%	Porcentagem

## RESUMO

TONON, Danielli Cecim da Silva. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) dos concretos compostos com agregados graúdos de construção e demolição em diferentes teores de substituição.** Porto Alegre. 2019. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O presente trabalho foi desenvolvido com objetivo de realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), analisando a influência da utilização do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) como Agregado Reciclado de Concreto (ARC) em diferentes teores de substituição por agregado natural. A mitigação dos danos causados pelos resíduos da construção e demolição (RCD) tem-se mostrado uma excelente alternativa na redução do impacto ambiental, causado pela atividade extrativista de recursos naturais, a fim de satisfazer as necessidades da construção civil. Uma das maneiras de contribuir para esta redução é a incorporação desses resíduos na produção de concretos. Para este trabalho serão produzidas amostras de concretos com teores 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição de brita basáltica por RCD, utilizando o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV) e será realizada uma análise de sensibilidade em dois cenários diferentes com distâncias de transporte distintas. O objetivo desta pesquisa é realizar a avaliação de ciclo de vida dos concretos produzidos com RCD e compará-los ao concreto convencional.

Palavras-Chaves: ACV, RCD, Concreto, Impacto ambiental, análise de sensibilidade.

## ABSTRACT

TONON, Danielli Cecim da Silva. ***Life cycle assessment (LCA) of composite concrete with large aggregates of construction and demolition at different replacement levels.*** Porto Alegre. 2019. Master. Graduation Program in materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The present study was developed with the purpose of performing a Life Cycle Assessment (LCA), evaluating the influence of using the Construction and Demolition Waste (CDW) as Recycled Concrete Aggregate (ARC) at different levels of substitution by natural aggregate. The damage mitigation caused by construction and demolition waste (CDW) has proven to be an excellent alternative in reducing the environmental impact caused by extraction activity of natural resources in order to satisfy the needs of the construction industry. One way to contribute in this reduction is incorporating these residues in the production of concretes. Those will be produced with 0%, 25%, 50%, 75% and 100% basalt replacement by CDW using Portland cement of high initial strength (CPV) and a sensitivity analysis will be performed in two different scenarios with different transport distances. The aim of this research is to perform the life cycle evaluation of concrete produced with RCD and to compare them with conventional concrete.

Key-words: LCA, CDW, concrete, environmental impact, sensitivity analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Fregonara et al. (2016) o termo sustentabilidade no setor da construção vem crescendo nas últimas três décadas. Gradativamente a população mundial compreende a necessidade de construir uma sociedade mais sustentável, pois o meio ambiente degrada-se decorrente de atividades da construção civil (ARAÚJO; CARDOSO, 2010).

O crescimento populacional é um fator que aumenta a demanda e o consumo por produtos naturais, assim como obras de infraestruturas e edificações. Verifica-se que a construção civil, setor que mais gera impactos ambientais como a emissão de gases de efeito estufa (GEE), é responsável pela produção do concreto que é o segundo maior material consumido no mundo (MEYER, 2009). Georgiopoulou e Lyberatos (2018) afirmam que o cimento é o responsável pela maioria dos impactos ambientais do concreto, devido ao alto consumo de energia utilizado na sua produção, consumindo recursos naturais, energia, fontes de combustíveis fósseis, matérias-primas não renováveis que são necessárias para o processo de aquecimento. Portanto a produção de cimento também é um fator que resulta em emissões significativas de GEE.

Segundo Teklay, Yin e Rosendahl (2016), a indústria de cimento gera uma emissão de carbono média mundial de 0,83 kg CO<sub>2</sub>/ Kg de cimento produzido. Percebe-se que a produção de cimento contribui com até 8% do total das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) antropogênico e é um dos principais emissores de CO<sub>2</sub> (VAUGHAN; NESLEN, 2015).

De acordo com Akhtar e Sarmah (2018), a extração das matérias-primas pode acarretar no esgotamento dos recursos naturais, danos à paisagem,

degradação do ecossistema e contaminação da água, do solo e do ar devido às emissões da produção e manuseio de materiais de construção.

Desta forma, Akhtar e Sarmah (2018) afirmam que não se deve apenas reduzir a pegada de carbono, a quantidade de CO<sub>2</sub> produzida todos os dias no mundo, e proteger o meio ambiente, mas também preservar os recursos naturais os quais são necessários para crescimento constante. Por isso, a importância de buscar uma construção mais sustentável e menos impactante é fundamental (BLANKENDAAL; SCHUUR; VOORDIJK, 2014).

Devido a essas preocupações, pesquisadores como Domagoj (2018), Georgiopoulou e Lyberatos (2018), Borghi, Pantini e Rigamonti (2018), Rosado et al. (2017), De Paula (2016), Bovea e Powell (2016) e Butera, Christensen e Astrup (2015) recomendaram diferentes abordagens para reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar os impactos ambientais, sendo uma delas a substituição parcial por resíduos ou subprodutos com propriedades cimentícias ou pozolânicas, como por exemplo, cinzas volantes, resíduo de borracha de pneu, resíduo de lodo de esgoto, resíduo de construção e demolição (RCD), entre outros. Uma forma de comparar os impactos ambientais gerados através da construção civil é através do uso da ferramenta de Avaliação de ciclo de vida (ACV).

Segundo a norma ISO 14.040 (ABNT, 2014), a ACV é considerada uma metodologia utilizada para avaliar os aspectos ambientais e os impactos associados a um produto ao longo de sua vida, do “berço ao túmulo”. A extração da matéria-prima, a produção, o uso e o descarte final são considerados para realização desta avaliação levando a coleta de dados e os procedimentos de cálculos para quantificar as entradas e as saídas. A ACV é considerada importante do ponto de vista da sustentabilidade (CAYS, 2017).

O quadro 1.1 apresenta pesquisas relacionadas ao assunto e os resultados obtidos com os devidos anos e autores.

Quadro 1.1 - Pesquisas e resultados relacionados à ACV.

Pesquisas	Resultados	Ano	Autor
Avaliação do ciclo de vida do gerenciamento de resíduos de construção e demolição	A modelagem da ACV demonstrou que a utilização do RCD na construção de estradas como material de substituição para cascalho natural era preferível ao aterro na maioria das categorias de impacto ambiental. O transporte de RCD e o transporte evitado de agregados naturais foram os processos mais importantes para a maioria das categorias não-tóxicas e uma categoria tóxica (toxicidade humana cancerígena), responsável por 60-95% do total de impactos	2015	BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP
Desenvolvimentos na avaliação do ciclo de vida aplicada para avaliar o desempenho ambiental de resíduos de construção e demolição	A pesquisa conclui que há uma necessidade de padronizar como aplicar a estrutura da ACV para analisar o desempenho ambiental dos sistemas de gerenciamento de RCD, a fim de poder comparar resultados de diferentes estudos de caso. O uso de processos padronizados, incluindo o limite do sistema e a unidade funcional, os dados de LCI adaptados ao contexto do estudo de caso e um conjunto comum de categorias apropriadas de avaliação de impacto são medidas que podem ajudar a aumentar a comparabilidade dos estudos.	2016	BOVEA; POWELL
Avaliação do ciclo de vida de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD)	Os resultados para os concretos com agregados reciclados tiveram influência pouco significativa nos impactos ambientais das misturas em comparação às misturas de referência. O trabalho não leva em conta os potenciais benéficos da não destinação do RCD para aterros ou outras formas de destinação final e a não extração de matéria-prima em decorrência do reuso do RCD nos concretos.	2016	DE PAULA
Avaliação do ciclo de vida do gerenciamento de resíduos de construção e demolição em uma grande área do Estado de São Paulo, Brasil	Os resultados destacaram a importância dos impactos evitados dos materiais recuperados, principalmente aqueles relacionados à reciclagem de aço, vidro e plástico. Levaram em consideração duas metodologias: linha de base da CML e Impact 2002+. Os resultados obtidos pela CML indicam que "Toxicidade humana" foi a categoria mais importante e pelo Impact 2002+ indicam que "Inorgânicos Respiratórios" e "Aquecimento Global" foram as categorias mais importantes.	2017	ROSADO et al.

Avaliação do ciclo de vida da gestão não perigosa de resíduos de construção e demolição (RCD) na região da Lombardia (Itália)	Os resultados mostram que, no cenário atual, os impactos ambientais induzidos são superiores aos benefícios decorrentes da reciclagem de CDW. Os maiores encargos ambientais advêm do transporte de resíduos e não são compensados pelos pequenos impactos evitados associados ao uso de agregados reciclados nas aplicações reais.	2018	BORGHI; PANTINI; RIGAMONT
Avaliação do ciclo de vida do uso de combustíveis alternativos em fornos de cimento: um estudo de caso	No estudo utilizou-se combustíveis alternativos, como RDF (combustível derivado de refugo), TDF (combustível derivado de pneu) e BS (lodo biológico) ou uma mistura deles em substituição parcial de combustíveis convencionais. Utilizando a metodologia ACV, conclui-se que a perspectiva mais ecológica é o cenário baseado em RDF, enquanto o menos preferível é o cenário baseado em BS.	2018	GEORGIPOULOU; LYBERATOS
Avaliação ambiental de concreto com cinzas de lodo de esgoto com base na ACV.	O uso das cinzas de lodo de esgoto como uma substituição parcial do cimento na indústria de concreto pode reduzir as cargas ambientais e reduzir os custos totais devido às necessidades reduzidas de matérias-primas.	2018	DOMAGOJ

Fonte: Adaptado de Urbanismo, Moraes e Sombrio (2015).

Para as pesquisas apresentadas no quadro 1.1, a ACV é considerada uma ferramenta valiosa para viabilidade ambiental na incorporação de resíduos na produção de cimento ou concreto.

Conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos de construção e demolição podem ser classificados como resíduos classe II A que são denominados resíduos não inertes, apresentam grandes potenciais de reciclagem e reutilização e que tem como propriedades a biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

De acordo com Bovea e Powell (2016), houve um aumento, em escala global, entre 2003 a 2010 na quantidade de artigos publicados de ACV sobre a gestão de RCD (Figura 1.1). Observa-se também que em 2013 e 2014 o número de publicações vem aumentando, indicando um maior interesse nesse campo.

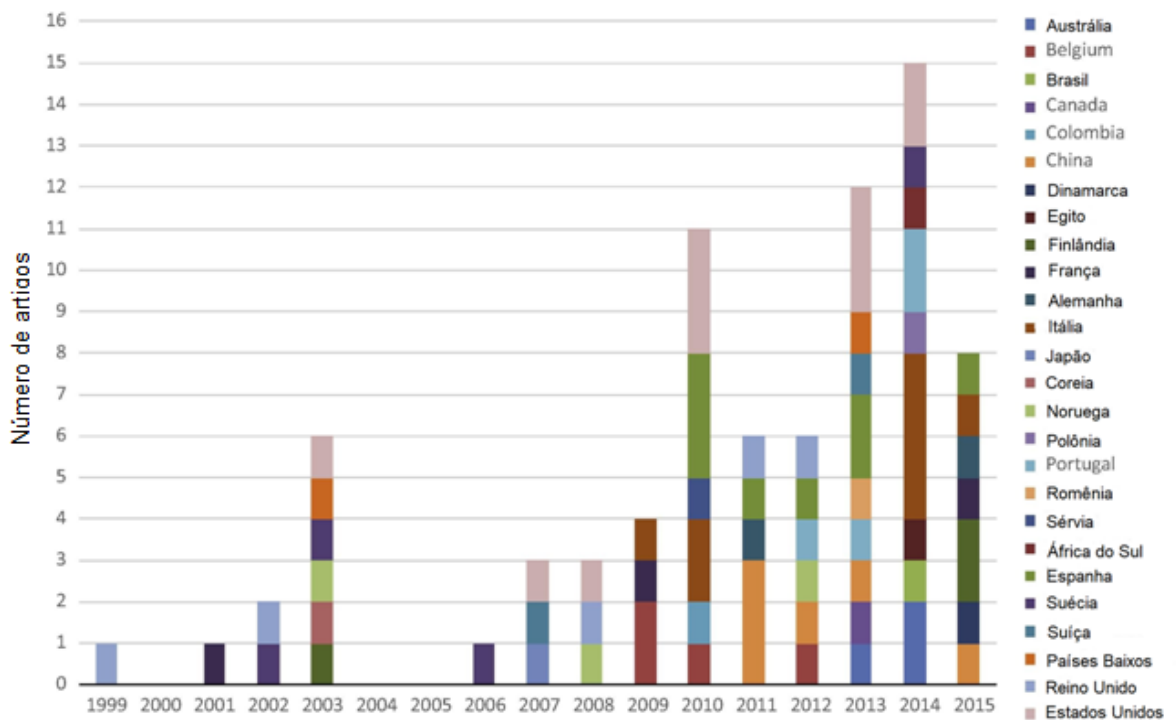


Figura 1.1 - Evolução temporal da literatura relacionada à ACV do RCD

Fonte: Bovea e Powell (2016).

Conforme a Figura 1.1 pode-se observar que 66,3% dos estudos relacionados à ACV sobre o desempenho ambiental do RCD estão vinculados aos países europeus, tendo como destaque a Espanha, Itália, Portugal e Suécia que foram os países que registraram mais publicações. Os demais estudos estão distribuídos em 17,5% para os Estados Unidos, 10% para a Ásia, dominado pela China, 3,8% para a Oceania, dominado pela Austrália e 2,5% para a África (BOVEA; POWELL, 2016).

No Brasil, a produção de RCD estimada é superior a 70 milhões de toneladas por ano, sendo aproximadamente 500 kg/ano per capita. Estes valores são variáveis e tem correlação com o índice de desenvolvimento humano (IDH) (CONTRERAS et al., 2016).

Bovea e Powell (2016) afirmam que em relação às estratégias de gerenciamento de resíduos empregando à logística do RCD, a reciclagem externa é utilizada em 80% dos estudos de casos revisados e que geralmente são



combinados com aterro das partes não recicláveis, como é mostrada na Figura 1.2.

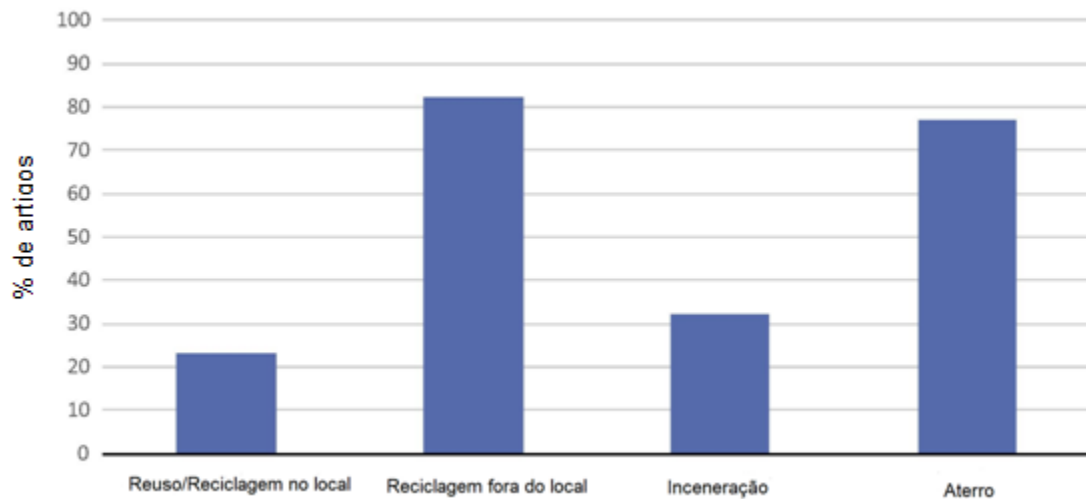


Figura 1.2 - Estratégias aplicadas para gestão de RCD

Fonte: Bovea e Powell (2016).

Dentro desse contexto, este estudo propõe-se a utilizar o resíduo de construção e demolição (RCD) com diferentes percentuais de teores de substituição para a fabricação de concretos, e será realizada a análise de avaliação do ciclo de vida (ACV) a fim de comparar os impactos gerados entre o concreto convencional, que contém somente agregados naturais, e o concreto com agregados de RCD.

## **2. OBJETIVOS**

A seguir serão apresentados o objetivo geral e os específicos, a delimitação e a estrutura da pesquisa.

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa é realizar a avaliação comparativa do concreto com adição de resíduo de construção e demolição (RCD) com o concreto convencional a partir da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

### **2.2. Objetivos Específicos**

Podem ser destacados, no emprego de RCD em diferentes percentuais de substituição e análise da ACV, como objetivos específicos:

- Avaliar os impactos ambientais através da ACV e realizar uma análise comparativa entre as amostras de concreto convencional e o concreto com agregados reciclados.
- Apresentar cenários com distâncias diferentes para as amostras de concretos com agregados reciclados.
- Avaliar as contribuições dos materiais constituintes.
- Realizar uma análise de sensibilidade dos diferentes cenários propostos.
- Avaliar os impactos ambientais através da ACV das amostras de concretos com cenários diferentes.

### **2.3. Delimitação da Pesquisa**

O presente trabalho delimita-se à análise da avaliação do ciclo de vida (ACV) dos concretos produzidos com resíduo da construção e demolição (RCD) como agregado graúdo em substituição ao agregado natural. Os materiais para a produção das amostras de concreto foram obtidos através da ferramenta Google Maps para estimas as distâncias de cada material até o prédio 30 da PUCRS onde foi realizada a concretagem.

### **2.4. Estrutura da Pesquisa**

A estrutura deste trabalho será dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução juntamente com a justificativa e a importância da pesquisa introduzida no contexto. No segundo capítulo é apresentado o objetivo geral, o objetivo específico e suas delimitações. O terceiro capítulo constituirá na apresentação de uma revisão bibliográfica com assuntos que serão abordados nesta pesquisa. O quarto capítulo apresentará os materiais e métodos que serão aplicados. No quinto capítulo será apresentado os resultados e as discussões e por fim no sexto capítulo será apresentado as conclusões com as sugestões para trabalhos futuros.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta um levantamento realizado sobre a resistência mecânica, durabilidade e avaliação do ciclo de vida dos concretos produzidos com agregados reciclados de construção e demolição com diferentes teores de substituição.

#### **3.1. Resíduo de Construção e Demolição (RCD)**

De acordo com a Resolução nº 307/2002 Art 2º do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2001), define os resíduos de construção civil (RCC) como:

“...são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha” (CONAMA, 2001).

Os resíduos de construção civil que também são conhecidos por resíduos de construção e demolição (RCD) e encontram-se em quantidades variadas na composição dos resíduos sólidos urbanos, devido as características das construções e do grau de desenvolvimento econômico de cada localidade (DE PAULA, 2016).

A Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2001), define os gerenciadores como responsável pelo gerenciamento dos RCD, pela segregação dos resíduos em diferentes classes, seu direcionamento

para reciclagem, disposição final adequada e essas áreas devem passar por um processo de licenciamento ambiental e fiscalização pelos órgãos ambientais.

Os resíduos de construção e demolição foram divididos, no Brasil, em quatro classes diferentes, indicados com as letras A, B, C e D, onde a classe A contém a maior parte dos resíduos reutilizáveis ou reciclados como agregados, cerca de 90% ou mais, que incluem argamassa, concreto, tijolos e solos de terraplanagem. Na classe B, encontra-se outros resíduos reutilizáveis e reciclados como plásticos, borracha, madeira, entre outros. A classe C apresentam-se os materiais que não podem ser reciclados ou reutilizados através de processamento tecnológico adequado. Já na Classe D, são os materiais perigosos, como tintas, solventes, óleos, entre outros. As principais atividades de produção de resíduos são a renovação e a demolição que representam 60% da produção total de RCD (AKHTAR; SARMAH, 2018).

O resíduo de Classe A é classificado como resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção e demolição, esses resíduos deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil e estar disposto para utilização ou reciclagem futura (CONAMA, 2001).

Devido à natureza química, os resíduos de construção e demolição incluem problemas onde o manuseio é limitado a aterros e a maioria das técnicas de processamento de resíduos não pode ser realizada, o que contém compostagem, incineração em caldeiras, degradação termoquímica e digestão aeróbica e anaeróbica. Desse modo, é preciso prever os problemas de escassez de terra para aterros sanitários e de aumento dos custos de transporte. Com isso, outras estratégias de gerenciamento de resíduos são impulsionadas como minimização, reutilização e reciclagem (AKHTAR; SARMAH, 2018). A estratégia de reciclagem pode trazer benefícios ambientais e econômicos, destacando também o custo do material reciclado que, por sua vez, é inferior ao do agregado natural. A utilização do RCD pode diminuir os impactos ambientais gerados pela produção de concreto (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Os RCD podem ser utilizados, em substituição aos agregados naturais, como agregado graúdo ou agregado miúdo na produção de argamassas e concretos. Pesquisas verificam que o agregado reciclado, geralmente, apresenta absorção de água mais elevada e massa específica aparente mais baixa quando são utilizados para confecção de blocos de concreto. Outros autores afirmam também que a resistência mecânica do concreto diminui à medida que aumenta o teor de substituição do uso do agregado reciclado em substituição ao agregado natural. Pode-se verificar de acordo com os estudos realizados por Pacheco et al. (2019), Bravo et al. (2018) e Medina et al. (2014).

Resultados relevantes são apresentados nos estudos de viabilidade do uso de RCD em substituição ao agregado natural para a produção de concretos com pequenas quantidades mesmo que as diferentes composições do RCD em função de suas origens influenciem diretamente nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos (BRAVO et al., 2018). Autores como Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) e Lotfi et al. (2015) observaram que os agregados graúdos reciclados, com teores inferiores a 30%, podem apresentar benefícios em relação às propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto quando é substituído o agregado graúdo natural.

### **3.2. Avaliação de Ciclo de Vida**

Diversos centros de pesquisas e empresas vêm aprimorando suas práticas de desenvolvimento sustentável em virtude da importância das questões ambientais que são motivadas por órgãos de controle ambiental e meios de comunicação, os quais refletem o interesse global em reduzir os impactos ambientais a fim de garantir uma melhor qualidade de vida dos seres vivos e manter o meio ambiente. As diretrizes para a produção mais sustentável servem para utilizar menos recursos renováveis e aprimorar o uso de recursos não renováveis, avaliando o nível de exploração das matérias primas para garantir a conservação desses recursos nas gerações futuras (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

Uma das metodologias mais utilizadas para avaliar os impactos ambientais é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), um método desenvolvido com uma abordagem global e que garante o alcance de uma avaliação ambiental e garante sua reprodutibilidade, é também uma ferramenta utilizada para identificar estratégias que melhorem o desempenho da gestão de resíduos (ABNT, 2014).

As normas Brasileiras que orientam a execução da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) são as: ABNT NBR ISO 14.040:2014 (Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estruturas) e a ABNT NBR ISO 14.044:2014 (Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações).

O começo da ACV se deu entre os anos de 1960 e 1980, quando as grandes indústrias da época decidiram detalhar o consumo de energia relacionado com a fabricação de seus produtos, a fim de melhorar o uso de recursos naturais e procurar melhores alternativas energéticas durante a crise do petróleo (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma metodologia utilizada para avaliar qualitativamente e quantitativamente os potenciais impactos ambientais e os recursos utilizados ao longo do ciclo de vida de qualquer produto, isto é, a logística dos impactos ambientais é demandada desde a extração da matéria prima até as fases de produção, utilização, descarte e reciclagem que exigem dados específicos sobre o processo de produção (MARINKOVIĆ et al., 2010; ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009; VAN DEN HEEDE; DE BELIE, 2012). A ACV é uma metodologia estruturada e padronizada, que quantifica os recursos relevantes consumidos, as emissões, os impactos ambientais e impactos relacionados à saúde, assim como os problemas de escassez de recursos associados a qualquer bem ou serviço (EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE, 2010).

A ACV enfoca os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto desde a aquisição da matéria prima até a disposição final, ou seja, o chamado “do berço ao túmulo” (ABNT, 2014). Ainda de acordo com a ABNT (2014), a ACV pode auxiliar nos seguintes aspectos:

- Na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- Na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais;
- Na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição;
- No marketing (como por exemplo uma declaração ambiental ou um programa de rotulagem ecológica).

De acordo com as normas ISO 14.040 e a ISO 14.044 (ABNT, 2014), a ACV consiste em quatro etapas: a primeira, definição do objetivo e escopo; a segunda, inventário do ciclo de vida; a terceira, avaliação dos impactos ambientais e a quarta e última etapa é a interpretação dos resultados.

A figura 3.1, representada abaixo, apresenta as quatro fases da Avaliação de Ciclo de Vida e como elas interagem entre si.

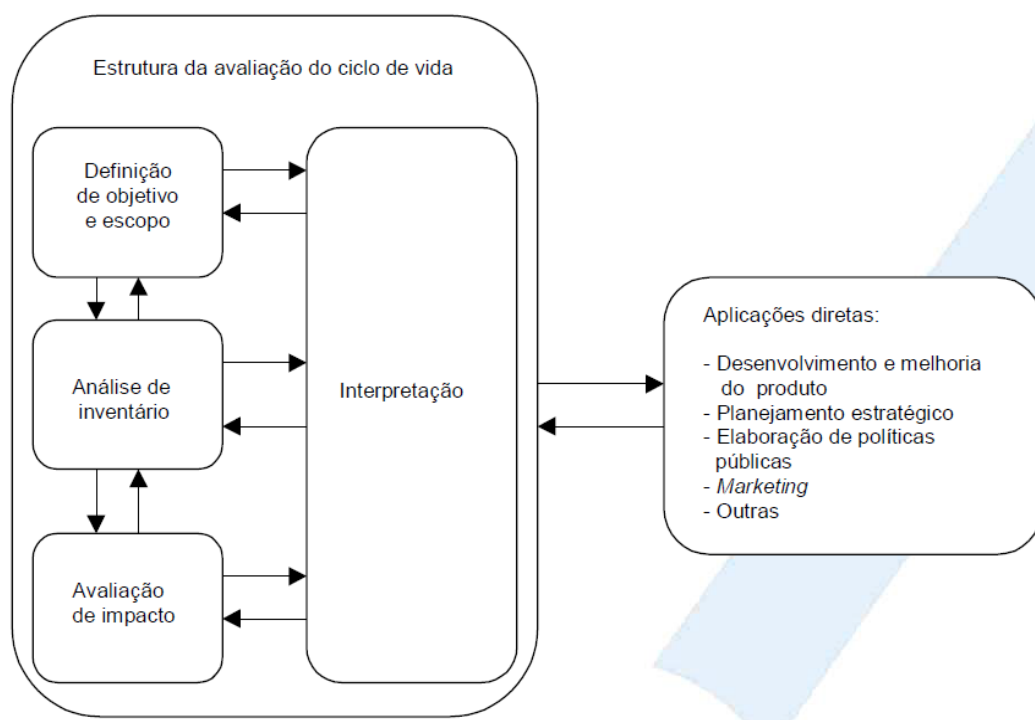


Figura 3.1 - Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas ISO 14.040 (2009).

Ainda de acordo com esta norma, definem-se as quatro fases da Avaliação do ciclo de vida, como:

Primeira fase - Definição de Objetivo e escopo: trata-se do escopo de uma ACV, a fronteira do sistema e o nível de detalhamento depende do objeto e o uso do estudo.

Segunda fase - Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV): refere-se ao inventário dos dados de entrada e de saída associados ao sistema de estudo; abrange também a coleta dos dados necessários para alcançar os objetivos.

Terceira fase – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV): tem como foco promover informações adicionais a fim de auxiliar na avaliação dos resultados do ICV, visando o melhor entendimento de sua significância ambiental.

Quarta fase – Interpretação do Ciclo de vida: os resultados de uma AICV são resumidos e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomadas de decisão de acordo com a primeira fase de definição de objetivo e escopo.

O termo “ciclo de vida” atribui-se à maioria das atividades no curso de vida do produto, as quais são aquisição de matéria prima, fabricação, utilização, manutenção e disposição final. A figura 3.2 demonstra os possíveis estágios de ciclo de vida e as estradas e saídas medidas que podem ser considerados em uma ACV (ABNT, 2014).

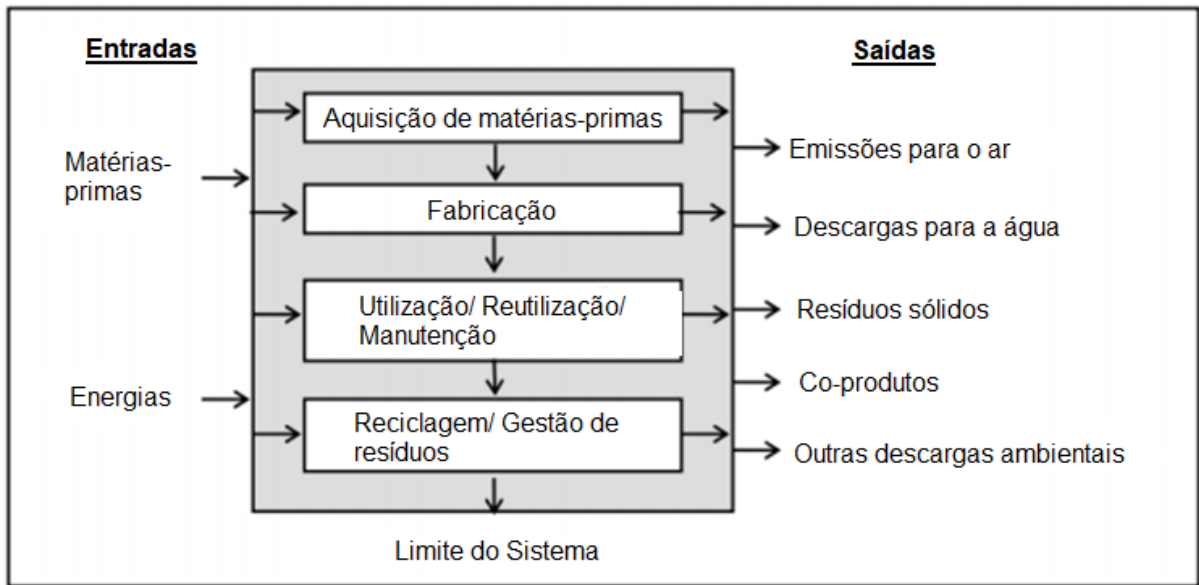


Figura 3.2 - Estágios do Ciclo de Vida do produto

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas ISO 14.040 (2009).

Com a realização de um levantamento de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) foram encontrados 577 trabalhos acadêmicos desde 1990 até 2018, sendo eles 43 de nível profissionalizantes, 384 dissertações de mestrados e 147 teses de doutorado com temas de ACV que foram defendidas junto aos programas de pós-graduação do Brasil. A figura 3.3 mostra a partição dos trabalhos acadêmicos nos três níveis de estudos.

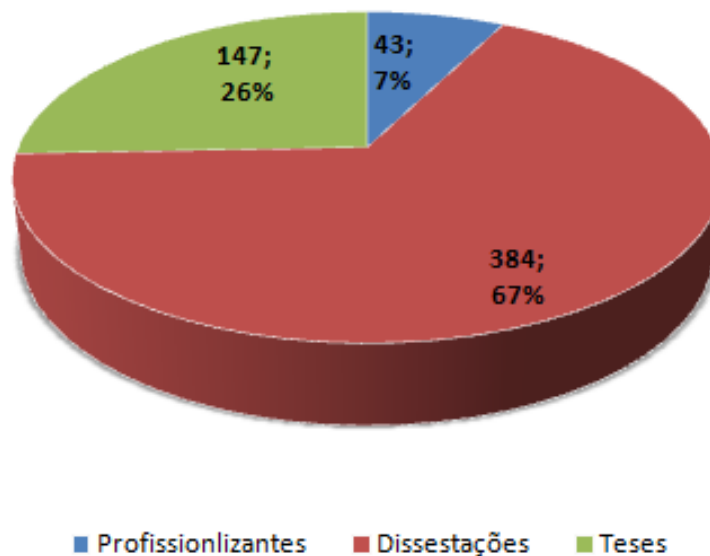


Figura 3.3 - Trabalhos acadêmicos com temas de ACV.

Fonte: Elaborado pela autora.

Um levantamento cronológico do banco de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) foi realizado para determinar a quantidade de estudos acadêmicos com temas de ACV no Brasil, entre 2003 a 2018. A figura 3.4 determina a quantidade de dissertações e teses em relação ao ano de defesa.

A tabela a seguir apresenta alguns artigos publicados que utilizaram a ferramenta de ACV como base.

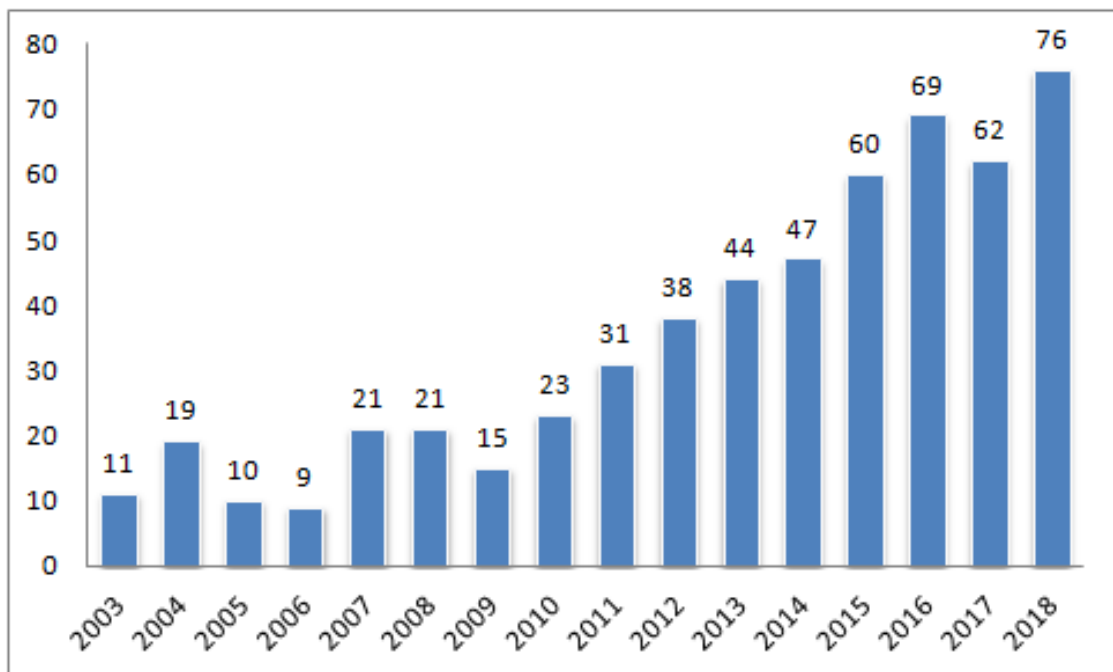


Figura 3.4 - Dissertações e teses com temas de ACV defendidas por ano no Brasil.

Fonte: Elaborado pela autora.

No Brasil, as pesquisas de dissertações e teses relacionadas com o tema de ACV deram origem em 1990 e veio crescendo lentamente, a partir de 2010 houve um aumento significativo até 2018, de 23 estudos a 76 estudos, respectivamente.

### **3.2.1. Definição do objetivo e escopo**

A definição do objetivo e escopo é a primeira fase da metodologia do ACV, que de acordo com a norma ISO 14.040 (ABNT, 2014), devem ser consistentes com a aplicação pretendida e devem ser claramente definidos.

Esta primeira fase consiste em fornecer um limite específico para as considerações de impacto ambiental, desse modo o limite das considerações de impacto ambiental em relação aos processos de construção deve ser limitado ao escopo que é executado pelos contratados (LI; ZHU; ZHANG, 2010).

Segundo a norma ISO 14.040 (ABNT, 2014), o objetivo de um estudo da ACV deve declarar a aplicação pretendida, os motivos para conduzir o estudo e o público alvo, ou seja, a quem os resultados do estudo serão comunicados, para determinar quais dados devem ser considerados. Na definição do escopo, devem ser considerados e claramente descritos os seguintes itens: a unidade funcional; os limites do sistema; os requisitos das qualidades dos dados; as fronteiras do sistema de produto; as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas; o sistema de produto a ser estudado; procedimentos de alocação; tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada; tipo de análise crítica, se aplicável; e tipo e formato do relatório requerido para o estudo, aplicação pretendida e devem ser claramente definidos.

A norma ISO 14.040 (ABNT, 2014) o escopo deve ser bem definido porque irá assegurar a profundidade, a extensão e o grau de detalhamento necessário ao estudo. Contudo é importante ressaltar que quando informações adicionais forem coletadas o escopo do estudo pode sofrer alterações enquanto o estudo estiver sendo conduzido.

### **3.2.2. Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**

A norma ISO 14.040 (ABNT, 2014), afirma que a análise do inventário do

ciclo de vida envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relacionadas com um sistema de produto. As entradas e saídas, que se referem ao material ou energia que entra e deixa a uma unidade de processo, podem incluir o uso de recursos e liberações no ar, na água e no solo associados com o sistema. Estes dados também constituem a entrada para a avaliação do impacto do ciclo de vida, compreendendo um banco de dados extenso.

O inventário do ciclo de vida deve apresentar os dados sobre as entradas e as saídas de cada processo individual no determinado sistema em estudo, englobando os fluxos de poluentes e os materiais e recursos em diferentes etapas, como por exemplo, a obtenção de matéria prima, o transporte de insumos, fabricação do produto, fase de uso, descarte e entre outros, adotando uma unidade padrão de material (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

Segundo Dong et al. (2015), o inventário de ciclo de vida documenta os fluxos de energia, materiais e emissões a fim de retratar a relação entre os processos da unidade e seus impactos ambientais.

De acordo com Moreau et al. (2012), o ciclo de vida do produto é composto por milhares de processos unitários e a coleta desses dados necessitaria de muito tempo e recurso, tornando impraticáveis alguns estudos. Dong et al. (2015), sugere como uma alternativa mais prática a utilização de banco de dados de inventário de ciclo de vida que armazenam os dados de inventário de diferentes processos de produção específicos de um país de origem.

É viável ressaltar que no inventário do ciclo de vida, os dados podem ser primários ou secundários, os dados primários são aqueles coletados diretamente dos produtores de bens e operadores de processo e serviço, já os dados secundários são os recolhidos a partir de bases de dados nacionais, consultores, grupos de investigação que são considerados como dados gerais ou genéricos (EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE, 2010).

### **3.2.3. Avaliação de Impacto Ambiental do Ciclo de Vida (AICV)**

De acordo com a norma ISO 14.040 (ABNT, 2014), a fase da Avaliação dos Impactos Ambientais tem como objetivo compreender e avaliar os impactos ambientais potenciais com base nos resultados da análise de inventário do ciclo de vida. O detalhamento, a escolha dos impactos que serão avaliados e as metodologias usadas dependem do objetivo e do escopo do estudo. Os métodos da avaliação dos impactos ambientais são integrados nos bancos de dados e implementados em ferramentas computacionais de ACV.

Nesta terceira fase, os dados de inventário são agregados em categorias de impacto ambientais específicas de acordo com um método de avaliação de impactos, o qual pode ser dividido em métodos de categoria única ou multicategoria, o de multicategoria são os mais utilizados e podem ser orientados a problemas (ponto médio) ou orientadas para danos (ponto final), com o objetivo de classificar, caracterizar, padronizar e avaliar os impactos potenciais sobre o esgotamento de recursos naturais, o ecossistema e a saúde humana (MONTEIRO; FREIRE, 2012).

Segundo Bare e Gloria (2008), o ponto médio é definido como um ponto na cadeia de causa e efeito, incluindo como exemplo a proteção do ozônio estratosférico, proteção climática global, formação de fumaça, acidificação e eutrofização. Os pontos finais são aqueles elementos físicos que a sociedade determina como merecedores de proteção e aborda os danos como resultados da mudança climática. Como os métodos do ponto final são orientados para dano, eles geralmente são considerados mais compreensíveis para tomadores de decisão.

A figura 3.5 representa os tempos de interpretação das abordagens do ponto médio e do ponto final.



Figura 3.5 - Abordagens do ponto médio e do ponto final

Fonte: Adaptado de Blankendaal, Schuur e Voordijk (2014).

Os métodos de avaliação de impacto ambiental do ciclo de vida (AICV) considerados e descritos pelo documento baseado nas normas da ISO, o ILCD Handbook (EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE, 2010), são: CML 2002, Eco-indicator 99, EDIP 1997, EDIP 2003, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, Ecological Scarcity Method, TRACI, MEEuP e USEtox.

### 3.2.4. Interpretação dos Resultados

A Interpretação é a fase que combina os resultados do inventário do ciclo de vida e a avaliação dos impactos ambientais de acordo com a definição do objetivo e escopo a fim de alcançar conclusões e recomendações finais (ABNT, 2014).

Para Vieira, Clamon e Coelho (2016), esta fase de interpretação é muito relevante, pois é o alicerce para tornar os resultados da avaliação de impacto comparáveis e compreensíveis.

Chaves (2014) determina que seja essencial que as interpretações dos resultados expliquem as limitações do estudo, realizando uma análise crítica em relação à qualidade dos dados e do método que foi empregado, com isso à interpretação pode ser considerada um processo iterativo, que permite rever e revisar as definições iniciais, bem como a qualidade e a natureza dos dados.

Mesmo que decisões e ações subsequentes possam vincular implicações ambientais identificadas nas constatações da interpretação, elas ficam além do escopo do estudo da ACV, visto que outros fatores, como aspectos econômicos e sociais e desempenho técnico também são considerados conforme a norma ISO 14040 (ABNT, 2014).

### 3.3. Histórico de Avaliação do Ciclo de Vida de Concretos

Domagoj (2018) quantificou os impactos ambientais do uso de cinzas de lodo de esgoto (SSA, em inglês) para substituir uma parte do cimento na produção de concreto e aplicou o método da avaliação de ciclo de vida (ACV) para avaliar e comparar os impactos ambientais do concreto que apresenta SSA com concreto de referência (com 100% de cimento).

A unidade funcional utilizada pelo autor foi de 1m<sup>3</sup> de concreto pré-misturado. As amostras foram preparadas com concreto de referência e para a produção de concreto com SSA foi substituído 10% do cimento pelas cinzas de lodo de esgoto. Nas duas amostras de concreto foram utilizados um superplastificante (Master Glenium SKY 629, BASF Chemicals), a fim de superar a redução da trabalhabilidade, para a amostra de referência utilizou-se 0,6% e para a amostra com SSA 1%. A ACV foi realizada com o software LCA GaBi Professional (DOMAGOJ, 2018). A tabela 3.1 apresenta os resultados da ACV.

Tabela 3.1 - Resultado dos impactos ambientais dos concretos utilizando a metodologia da ACV.

Categorias de impacto	Unidade	Concreto de Referência e Aterro da SSA	Concreto com 10% de SSA
Depleção de recursos abióticos	[·10 <sup>-6</sup> kg Sb eq.]	415,40	375,89
Mudanças climáticas	[kg CO <sub>2</sub> eq.]	237,88	218,67
Depleção de ozônio estratosférico	[·10 <sup>-9</sup> kg R11 eq.]	13,00	12,50
Potencial de toxicidade humana	[kg DCB eq.]	66,50	59,95
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre	[·10 <sup>-6</sup> kg DCB eq.]	539.668,07	485.441,94



Oxidação Fotoquímica	[·10 <sup>-6</sup> kg etilen eq.]	26.560,50	23.578,42
Potencial de Acidificação	[·10 <sup>-6</sup> kg SO <sub>2</sub> eq.]	424.522,05	390.731,59
Potencial de Eutrofização	[·10 <sup>-6</sup> kg fosfatos eq.]	63.380,04	59.360,27

Fonte: Domagoj (2018).

De acordo com os dados de Domagoj (2018), em todas as categorias de impacto o concreto com 10% de cinzas de lodo de esgoto é mais ambientalmente benéfico, gerando de 5 a 11% menos impactos ambientais comparado com o concreto de referência. O valor médio de redução dos impactos ambientais com base em todas as categorias é 9%. Pode-se observar que as mudanças climáticas de caíram 9% com o uso do SSA. As duas amostras de concreto apresentam as mesmas características técnicas na resistência à compressão e à flexão, profundidade de penetração de água entre outros.

O estudo mostra que o uso do SSA como substituição parcial do cimento é uma solução tecnicamente viável para reduzir os impactos ambientais levando a uma redução nos custos pelo fato de diminuir o uso de matérias-primas, reduzir o uso excessivo do cimento Portland e diminuir a quantidade de resíduos em aterros (DOMAGOJ, 2018).

Marinković et al. (2010) compararam o impacto ambiental da produção de dois tipos de concreto pré-misturado, o concreto agregado natural (NAC, em inglês) e concreto agregado reciclado (RAC, em inglês). A unidade funcional utilizada pelos autores foi de 1m<sup>3</sup> de NAC e RAC. O traço de NAC e RAC foi determinado para que ambos os tipos de concreto tenham a mesma resistência à compressão e a mesma trabalhabilidade. A fim de permitir uma avaliação comparativa do impacto ambiental, a análise foi limitada a um tipo de estrutura de concreto em que se aplicam as condições ambientais não agressivas.

A metodologia utilizada para avaliação dos impactos foi orientada para os problemas (pontos centrais) e os impactos ambientais analisados foram:

aquecimento global, acidificação, eutrofização e criação fotoquímica de oxidantes (MARINKOVIĆ *et al.*, 2010).

Marinković *et al.* (2010) fizeram adição de água nos agregados reciclados, devido a elevada demanda de água comparados com os concretos naturais, para saturar esses agregados antes do processo de mistura de maneira a obter uma trabalhabilidade adequada do concreto com agregados reciclados. Em relação aos transportes dos agregados reciclado, os autores propuseram dois cenários, no primeiro cenário as distâncias de transporte do agregado reciclado são menores que as do agregado natural e no segundo cenário a distância de transporte dos agregados reciclados é a mesma que dos agregados naturais.

A figura 3.6 mostra a contribuição para as categorias de impacto ambientais de várias fases na extração de matéria-prima e parte de produção de material do ciclo de vida do NAC e RAC para ambos os cenários de transporte.

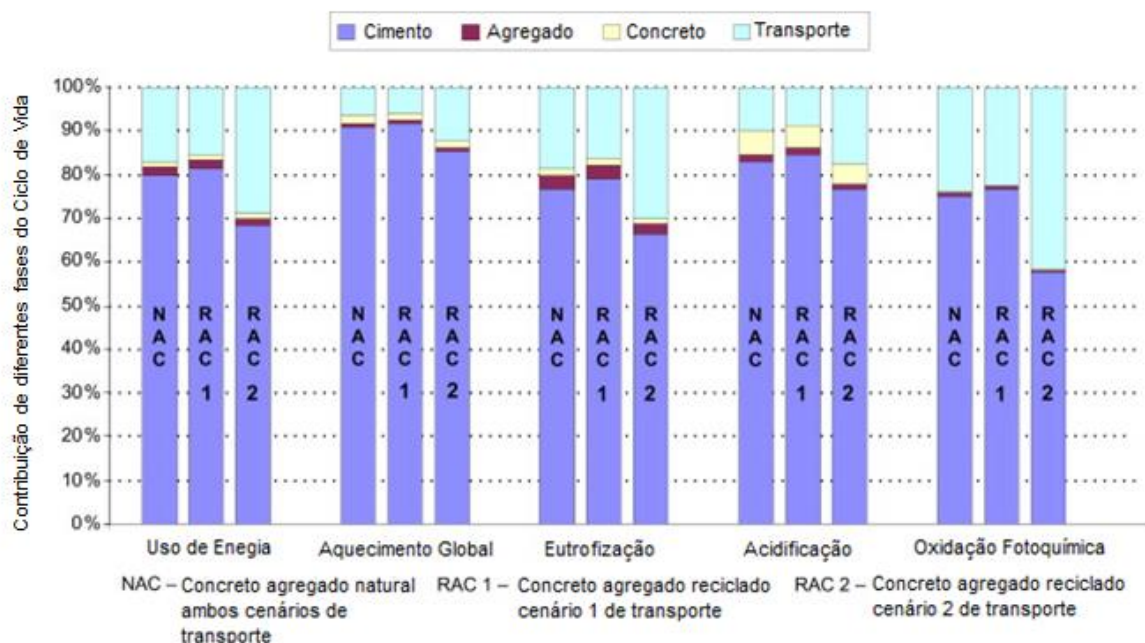


Figura 3.6 - Impactos ambientais das diferentes fases do ciclo de vida de NAC e RAC

Fonte: Marinković *et al.* (2010).

Segundo Marinković *et al.* (2010), os resultados mostram que tanto para o

RCA quanto para o NCA a produção de cimento foi a que mais contribuiu em todas as categorias de impacto, isso se dá pela elevada taxa de emissão de dióxido de carbono devido ao processo de calcinação durante a produção do clínquer e no uso de combustíveis fósseis. A fase de produção do cimento e a fase de transporte teve grande contribuição para o custo ambiental e dependeu diretamente das distâncias envolvidas e do tipo de veículo. No segundo cenário, no qual as distâncias de transporte são iguais, os impactos totais de RCA são significativamente maiores que o do NCA, visto que os agregados reciclados foram transportados por caminhões, veículos mais poluentes, e os agregados naturais por embarcações, veículos menos poluentes. Independentemente do cenário de transporte, os impactos das fases do ciclo de vida do cimento e da produção agregada para o RAC são ligeiramente maiores do que para o NAC.

Marinković et al. (2010) evidenciam que os tipos de agregados e métodos de transporte adotados em seu estudo representam o pior cenário para os RCA, máxima taxa de substituição do agregado graúdo e veículo de transporte mais poluente, e representam o melhor cenário para os NCA, agregado de origem fluvial e veículo de transporte menos poluente. Os autores evidenciam também que outros cenários podem ser favoráveis para os RCA.

Borghi, Pantini e Rigamont (2018) avaliaram os impactos ambientais, aplicando a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), associados ao sistema de gestão de resíduo de construção e demolição (RCD) não perigosos implementados na região da Lombardia (Itália). A unidade funcional (UF) da ACV adotada foi de uma tonelada de mistura de RCD não perigosa. A porcentagem de 90,7% dos RCD é tratada em instalações de reciclagem, 6% é armazenado em estações de transferência sem ser submetido a qualquer tratamento e 3,3% é descartado em aterros sanitários.

Borghi, Pantini e Rigamont (2018) utilizaram dois métodos de caracterização para a avaliação de impacto, sendo eles: o método ILCD 2011 (Sistema Internacional de Dados de Ciclo de Vida de Referência), que considera todas as categorias de impacto exceto as categorias de uso da terra e impacto das radiações

ionizantes; e o segundo método foi o CED (Demanda Cumulativa de Energia) que avalia o desempenho energético. Duas principais categorias de instalações de reciclagem foram identificadas durante as visitas técnicas: plantas estacionárias alimentadas por eletricidade e plantas móveis movidas a diesel.

O total de resíduos que são destinados às plantas compreende em fluxos diretos (resíduos dos produtores para as plantas receptoras) e em os fluxos indiretos (resíduos de uma planta para outra), a distância média utilizada tanto para o fluxo direto e indireto foi de 27,5 km e a maior parte de tipo de caminhões utilizados foram os caminhões superiores a 32 toneladas. Modelaram um cenário de melhor caso, onde todo o RCD é enviado para reciclagem, todas as usinas de reciclagem são movidas a eletricidade e as distâncias de transporte foram reduzidas ao valor mínimo de sua faixa (BORGHI; PANTINI; RIGAMONTI, 2018).

Segundo os autores, a Avaliação de Ciclo de Vida foi realizada com o software SimaPro 8.3 e os impactos ambientais gerais referentes a uma tonelada de RCD são apresentados na tabela 3.2 e a figura 3.7 apresenta a contribuição percentual associado ao atual gerenciamento de cada fase (transporte, armazenamento, reciclagem e disposição final).

Tabela 3.2 - Impactos Ambientais gerais referentes a 1 tonelada de RCD.

Categorias de impacto ambiental (método ILCD)	Unidade	Cenário atual	Cenário de aterro	Melhor cenário
Alterações Climáticas	kgCO <sub>2</sub> eq / t	3,40	11,44	-1,78
Depleção do ozônio	kg CFC-11 eq / t	9.3E-07	3.09E-06	-5.1E-08
Toxicidade humana, efeitos não cancerígenos	CTUh / t	7.32E-06	1.86E-04	1.0E-07
Toxicidade humana, efeitos cancerígenos	CTUh / t	5,00E-06	3,43E-06	4,6E-06
Assunto particular	kg PM <sub>2,5</sub> eq / t	2.93E-03	9.21E-03	-1.3E-03
Formação de ozônio fotoquímico	kg NMVOC eq / t	0,03	1,39	-1.0E-02
Acidificação	mol H <sup>+</sup> eq / t	0,02	8,22E-06	-1.0E-02
Eutrofização terrestre	mol N eq / t	0,10	7.90E-02	-3,3E-02
Eutrofização de água doce	kg P eq / t	-1.38E-03	8.30E-02	-1.8E-03
Eutrofização marinha	kg N eq / t	0,01	2.66E-01	-3.1E-03

Ecotoxicidade de água doce	CTUe / t	226,07	3.06E-03	65,5
Depleção de recursos hídricos	m <sup>3</sup> eq de água / t	0,02	2.45E-02	1.4E-02
Depleção de recursos minerais, fósseis e renováveis.	kg Sb eq / t	2.81E-04	4031,7	9.1E-05
Impacto energético (CED)	MJ eq / t	65	304	-24.1
Consumo de recursos naturais (areia e cascalho)	kg / t	-611.4	175,3	-1025,4

Fonte: Borghi, Pantini e Rigamont (2018).

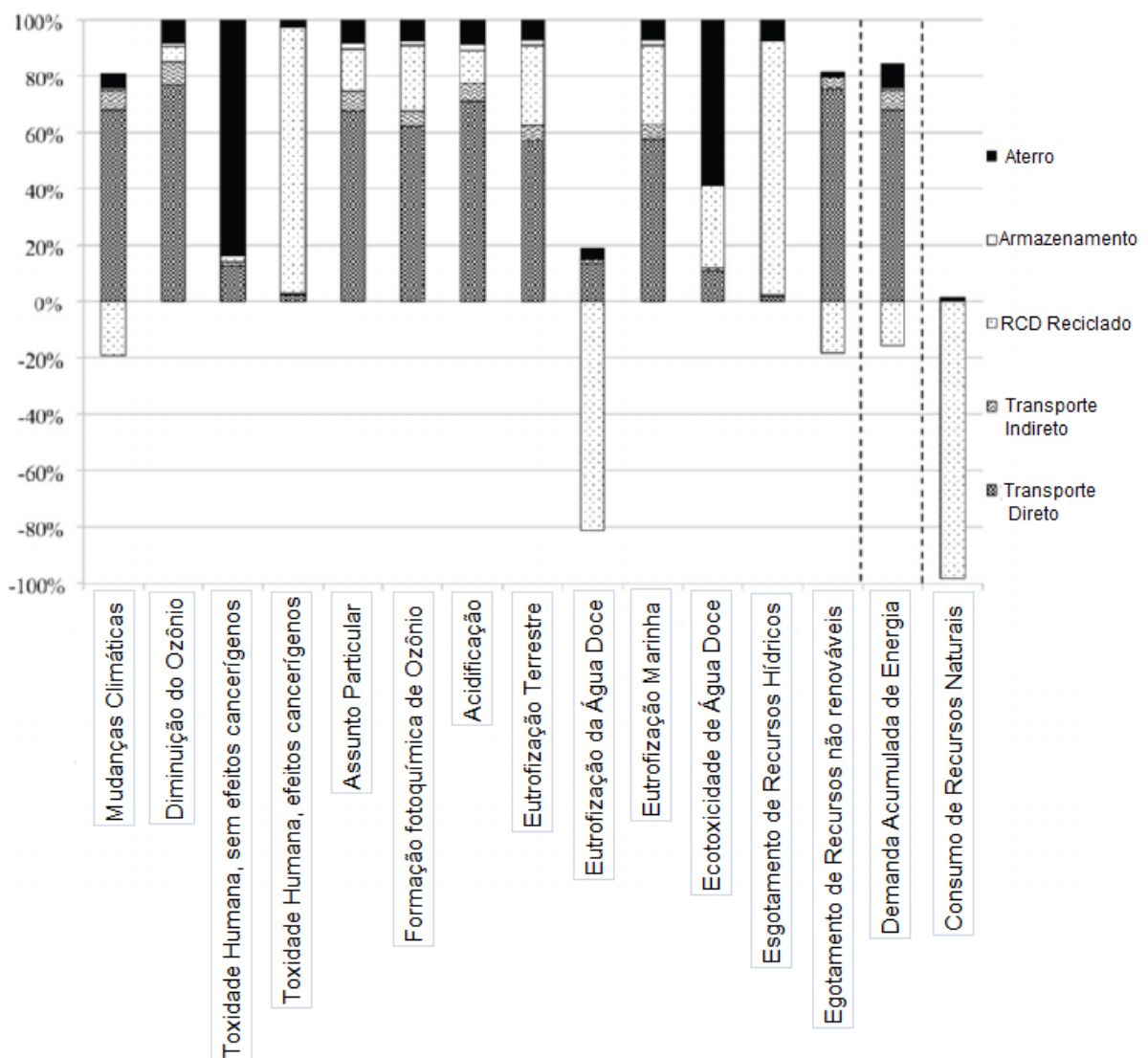


Figura 3.7 - Análise de contribuição dos impactos associados ao gerenciamento de RCD

Fonte: Borghi, Pantini e Rigamont (2018).

Borghi, Pantini e Rigamont (2018), observaram que apenas os indicadores

de eutrofização de água doce e de consumo de recursos naturais mostram valores negativos no sinal, indicando que os impactos evitados são maiores do que os impactos adicionados. Os impactos ambientais induzidos são superiores aos benefícios que vem da reciclagem de RCD e os maiores encargos ambientais decorrem do transporte de resíduos. A comparação entre os resultados da ACV do cenário atual e os do melhor cenário mostrou que há um amplo espaço para melhorias, como por exemplo, o indicador de mudanças climáticas de 3,4 kgCO<sub>2</sub> eq/t para -1,78 kgCO<sub>2</sub> eq/t e a economia de areia e cascalho aumentam de 611,4 kg/t para 1025,4 kg/t.

Serres, Braymand e Feugeas (2016) quantificaram os impactos ambientais de três amostras de concreto de 20 mm através da ferramenta de Avaliação de ciclo de vida. As três amostras foram de concreto tradicional (concreto de referência), confeccionados com agregados naturais; concreto reciclado, confeccionados com agregados graúdos e miúdos reciclados; e concreto misto, confeccionados com agregados graúdos reciclados e agregado miúdo natural. A unidade funcional adotada pelos autores foi baseada em um modelo de fluxo de referência de m<sup>3</sup> de produto.

O software SimaPro 7.2 foi utilizado para realizar a avaliação de ciclo de vida e utilizaram vários métodos de avaliação de impacto sendo um deles o CML, que agrupa os resultados do inventário de ciclo de vida em categorias de ponto médio. A figura 3.8 apresenta o indicadores de impacto ambiental das três amostras de concreto realizado pela ACV (SERRES; BRAYMAND; FEUGEAS, 2016).

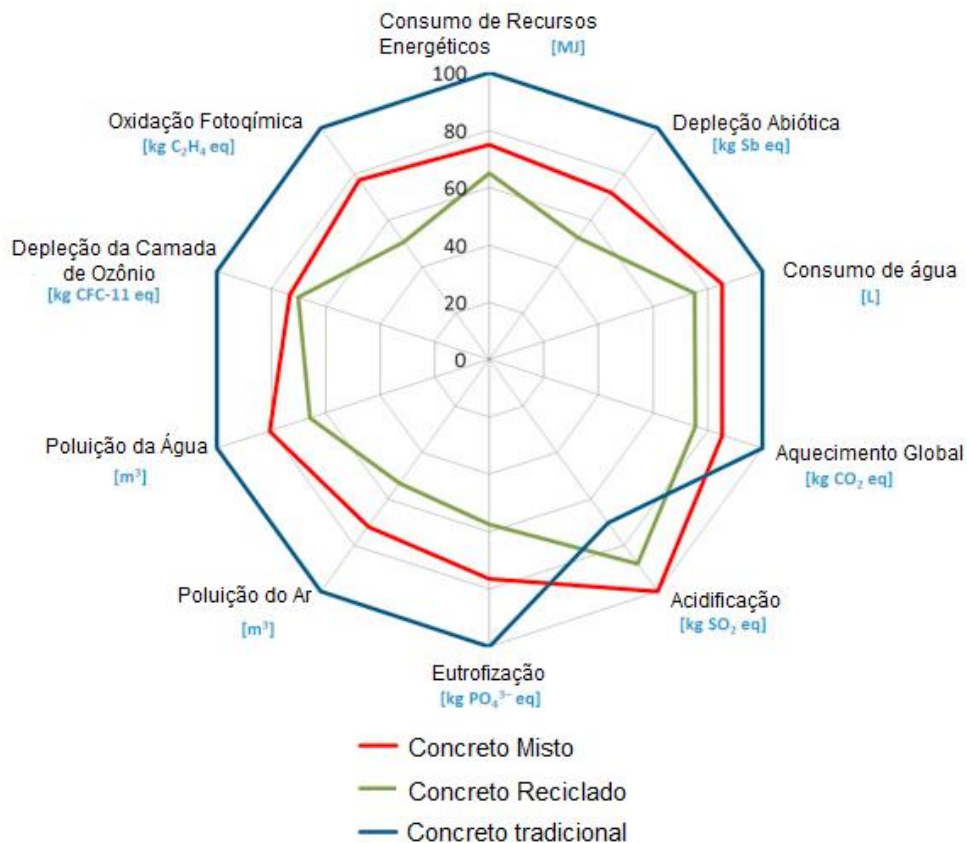


Figura 3.8 - Avaliação ambiental das amostras de concreto de 20 mm.

Fonte: Serres, Braymand e Feugeas (2016).

De acordo com Serres, Braymand e Feugeas (2016), os resultados obtidos para os três tipos de concreto podem ser comparados diretamente pois as forças mecânicas são iguais, em relação a resistência à compressão, obteve-se o mesmo resultado devido a utilização de mesma quantidade de cimento e alterando a quantidade de água.

O concreto com agregado reciclado apresenta melhor comportamento ambiental, sendo a maioria dos impactos ambientais inferiores comparado com o concreto tradicional e o concreto misto. O aumento da acidificação nos concretos reciclados e misto pode ser explicado pela adição de superplastificantes que são substâncias com alto potencial de acidificação atmosférica durante sua síntese, como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, ácidos e entre outros são liberados para a atmosfera. A redução das distâncias transporte e quantidade de material explica os valores mais baixos nas categorias de mudanças climáticas e poluição do ar nos concretos reciclados e

misto, pois essas duas amostras são total e parcialmente realizadas com agregado reciclado e areia reciclada, logo não é necessário a extração e transporte de matéria-prima (SERRES; BRAYMAND; FEUGEAS, 2016).

### 3.4. Outras Pesquisas Relacionadas ao Tema

O quadro 3.1 apresenta alguns artigos elaborados anteriormente com o tema de ACV seguidos dos objetivos, anos e os respectivos autores.

Quadro 3.1 - Pesquisas e objetivos relacionados à ACV.

Artigos	Objetivos	Ano	Autores
Avaliação do ciclo de vida dos materiais de construção: análise comparativa dos impactos energéticos e ambientais e avaliação do potencial de melhoria do eco-eficiência.	Aprofundar o conhecimento das especificações ambientais e energéticas dos materiais de construção, analisando suas possibilidades de melhoria e fornecendo orientações para a seleção de materiais no projeto ecológico de novos edifícios e na reabilitação de edifícios existentes.	2011	BRIBIÁN; CAPILLA
Avaliação do impacto ambiental e do ciclo de vida (ACV) de concretos tradicionais e "verdes": revisão de literatura e cálculos teóricos.	Comparar com precisão o impacto ambiental geral do concreto tradicional e "verde".	2012	VAN DEN HEEDE; DE BELIE
Avaliação do ciclo de vida no setor da construção: uma revisão.	Visão geral da situação atual da avaliação do ciclo de vida na indústria da construção, tanto de desenvolvimentos regulatórios quanto de estudos de casos acadêmicos.	2013	BUYLE; BRAET; AUDENAERT
Análise do Inventário do Ciclo de Vida de um galpão de concreto armado pré-moldado para armazenamento de mercadorias.	Qualificar e quantificar os recursos, os materiais e a demanda de energia para as fases de construção, uso e fim de vida do galpão.	2014	INGRAO et al.
Substituindo dados locais para inventários de ciclo de vida no exterior - um estudo de caso de produtos de concreto em Hong Kong.	Investigar as consequências da substituição de dados específicos do site pelos LCIs existentes no exterior e dar sugestões sobre como realizar o ajuste nos conjuntos de dados de LCI no exterior com base em um estudo de caso do concreto em Hong Kon.	2015	DONG et al.



Melhorando o desempenho de CO <sub>2</sub> do cimento, parte I: utilizando a avaliação do ciclo de vida e os principais indicadores de desempenho para avaliar o desenvolvimento dentro da indústria de cimento.	Realizar uma ACV atribucional e comparar três produtos de cimento diferentes produzidos em configurações de produção lineares e sinérgicas. Desenvolver e testar um modelo simplificado de ACV para este cluster de produção.	2015	FEIZ et al.
Avaliação do ciclo de vida da gestão de resíduos de construção e demolição.	Quantificar, com base na ACV, os possíveis impactos ambientais associados à utilização de RCD na construção de estradas.	2015	BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP
Avaliação do ciclo de vida (ACV) aplicada à fabricação de concreto comum e ecológico: uma revisão.	Apresentar o estado da arte dos métodos de ACV aplicados à fabricação de concreto comum e ecológico. Conceitos e ferramentas são discutidos.	2016	VIEIRA; CLAMON; COELHO
Desenvolvimentos na avaliação do ciclo de vida aplicados para avaliar o desempenho ambiental de resíduos de construção e demolição.	Gerar um mapeamento geral da literatura e identificar as melhores práticas em conformidade com a estrutura de ACV e propor orientações para futuros estudos de ACV nesse campo.	2016	BOVEA; POWELL
Avaliação ambiental de concreto feito a partir de agregado de concreto reciclado implementando avaliação do ciclo de vida.	Quantificar os impactos ambientais associados à mistura de composições de concreto feitas de resíduos usando ACV.	2016	SERRES; BRAYMAND; FEUGEAS
Avaliação do ciclo de vida da produção de cimento Portland: um estudo de caso do sul da Europa.	Avaliar os impactos ambientais do uso de resíduos como uma substituição parcial de combustíveis fósseis em uma fábrica de cimento representativa no sul da Europa.	2016	STAFFORD et al.
Avaliação do ciclo de vida da produção de agregados reciclados naturais e mistos no Brasil.	Elaborar um inventário do ciclo de vida regional para a produção de agregado natural e agregado reciclado misto no Brasil e desenvolver um estudo comparativo de ACV sobre os impactos ambientais produção de agregado natural e agregado reciclado misto.	2017	ROSADO et al.
Avaliação do ciclo de vida da gestão não perigosa de resíduos de construção e demolição (RCD) na região da Lombardia (Itália).	Aplicar a metodologia de ACV para avaliar o desempenho ambiental da atual gestão regional do RCD e identificar aspectos críticos e possíveis ações de melhoria.	2018	BORGHI; PANTINI; RIGAMONT

Avaliação ambiental de concreto com cinza de lodo de esgoto baseado em ACV.	Mostrar e quantificar os impactos ambientais do uso do lodo de esgoto como substituto parcial do cimento na produção de concreto, onde a ACV será usada como ferramenta para avaliar impactos potenciais.	2018	DOMAGOJ
Avaliação do ciclo de vida do uso de combustíveis alternativos em fornos de cimento: um estudo de caso.	Avaliar os impactos ambientais do uso de combustíveis alternativos em relação aos combustíveis convencionais na operação do forno.	2018	GEORGIPOULOU; LYBERATOS
Avaliação do ciclo de vida da gestão de resíduos de construção e demolição em uma grande área do Estado de São Paulo, Brasil.	Avaliar os impactos ambientais potenciais da gestão do RCD em municípios representativos da PCJ Watershed.	2019	ROSADO et al.
Uma revisão da avaliação do ciclo de vida do concreto agregado reciclado.	Identificou os problemas existentes na aplicação do método ACV no concreto reciclado a partir de 5 aspectos, incluindo método de projeto de mistura, seleção de unidades funcionais, alocação de inventário, absorção de CO <sub>2</sub> durante o ciclo de vida do concreto e distância de transporte do agregado reciclado.	2019	ZHANG et al.
Um estudo de ACV para investigar estratégias eficientes de recursos para o gerenciamento de resíduos de gesso pós-consumo na região da Lombardia (Itália).	Avaliar soluções ambientais sustentáveis para o manejo do resíduo de gesso na região da Lombardia (Itália), com base na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.	2019	PANTINI; GIURATO; RIGAMONTI

Fonte: Adaptado de Urbanismo, Moraes e Sombrio (2015).

A partir do exposto por tais autores, percebe-se que a ACV é de grande importância no contexto ambiental, pois permitir a verificação da contribuição dos impactos ambientais em diversas categorias de impacto sendo relacionados à saúde, ambientais e emissões e buscar uma melhor alternativa energética.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Objetivo e Escopo**

O principal objetivo deste trabalho consiste em realizar uma avaliação comparativa do desempenho ambiental entre o concreto convencional e o concreto com substituição de agregado graúdo por RCD, considerando a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) e implementar uma análise de sensibilidade para diferentes tipos de cenários.

A ACV foi conduzida conforme prescrito na NBR ISO 14.040 e na NBR ISO 14.044. O software para modelagem empregado neste estudo será o SimaPro 9.0, que contempla a base de dados Ecoinvent v3.0, para avaliação das categorias de impacto. O método de cálculo utilizado para a caracterização e normalização dos impactos de ciclo de vida será o CML 2002 (Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, 2002).

A unidade funcional empregada no estudo é de 1 m<sup>3</sup> de concreto, conforme já adotada em outros trabalhos, como o de Zhang et al. (2019), Domagoj (2018), Bovea e Powell (2016), Viera, Calmon e Coelho (2016), De Paula (2016), Dong et al. (2015), Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012), Marinković et al. (2010).

Em relação ao processo de execução, inicialmente foram definidas as fronteiras do estudo e unidade funcional do sistema. Em seguida, foram definidos os procedimentos para coletas de dados do RCD, separando-o no que será utilizado e no que será descartado, obtendo assim as porcentagens do RCD utilizado. Na sequência, o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) foi construído, levando-se em consideração dados do concreto convencional e do concreto com RCD, sendo

estabelecidos os fluxos de entrada e saída de materiais e energia para cada unidade de processo do sistema relacionado ao produto. Em seguida, o processo foi modelado e os impactos gerados no *software* SimaPro 9.0. Na sequência, os dados foram avaliados os impactos ambientais analisados, onde a figura 4.1 apresenta o fluxograma das etapas realizadas na pesquisa.

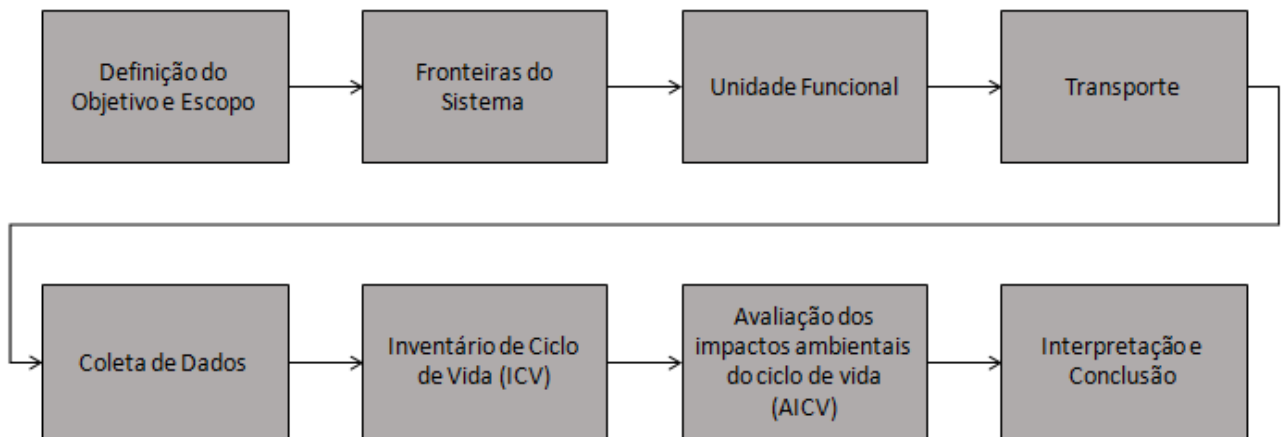


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa

Fonte: Adaptado de Cunha (2016).

## 4.2. Fronteiras do Sistema

A fronteira adotada foi de uma abordagem *cradle-to-gate*, ou seja, do berço ao portão, que considera o ciclo de vida do produto desde a extração de matéria prima até a porta da “fábrica”. Tal abordagem já foi realizada em trabalhos similares por Domagoj (2018), Medeiros et al. (2018), Silvestre, Brito e Margarida (2017), De Paula (2016), Stafford et al. (2016) e Dong et al. (2015).

A figura 4.2 apresenta a fronteira do sistema em estudo, onde foram considerados os processos e obtenção das matérias primas (cimento, areia, agregado graúdo e água), o processamento/produção, o beneficiamento do RCD, o transporte e a concretagem.

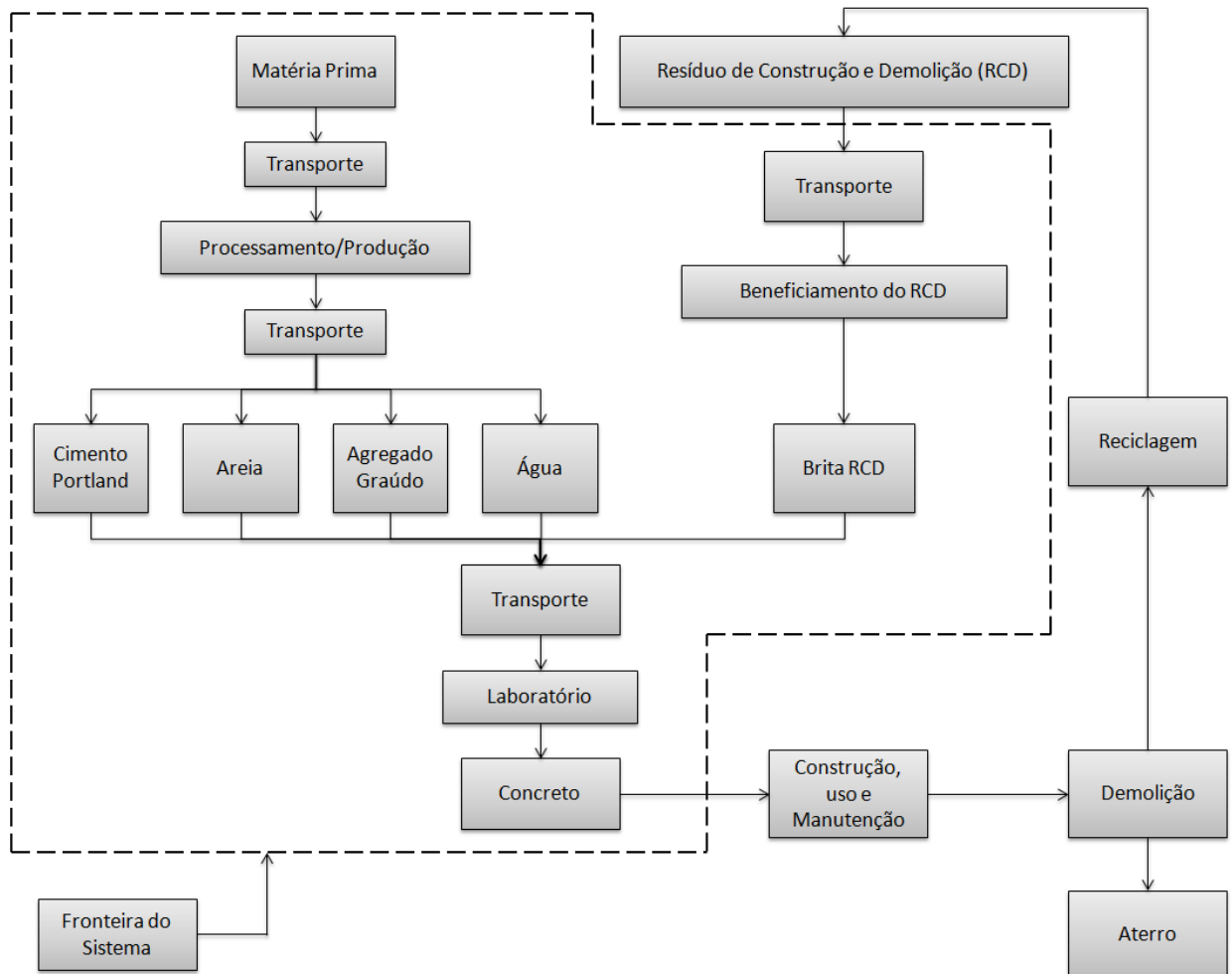


Figura 4.2 - Fronteira do sistema do produto

Fonte: Baseado em De Paula (2016).

O *software* SimaPro contém um amplo banco de dados e uma série de métodos de avaliação de impactos para avaliação do ciclo de vida; apresenta informações organizadas, claras e com facilidade de localizá-las. Além de conter um banco de dados de diversos produtos, permite a criação de novos processos ou produtos conforme o desejo do usuário e caso tenha dados mais atualizados ou condizentes com sua realidade (OLIVEIRA; CASTRO; SAFAR, 2007).

### 4.3. Tipos de cenários e transporte

Inicialmente foram realizadas análises preliminares visando verificar o efeito de diversas distâncias de transporte do RCD nos indicadores associados com a ACV. Foram feitas simulações preliminares variando as distâncias a cada 50 km, cujos resultados encontrados mostram que abaixo de 180 km e 500 km para a amostra de concreto com substituição de 50% e 25%, respectivamente, do agregado natural pelo RCD é benéfica esta substituição, pois os impactos ambientais foram inferiores ou se igualaram ao concreto de referência.

Tabela 4.1 – Distâncias dos cenários 1, 2 e 3.

	Distâncias (km)
Cenário 1	80
Cenário 2	180
Cenário 3	500

Fonte: Elaborada pela autora.

A figura 4.3 apresenta o raio das distâncias de 80 km (ponto A), 180 km (ponto B) e 500 km (ponto C) dos cenários 1, 2 e 3, respectivamente, em torno da cidade de Porto Alegre.

Figura 4.3 - Mapa das distâncias dos cenários 1, 2 e 3.



Fonte: Elaborada pela autora.

As distâncias de transporte do cimento e dos agregados foram estimadas baseados na ferramenta Google Maps. Em todos os cenários também foram utilizadas as mesmas distâncias do cimento e dos agregados naturais. O cimento Portland (CP V-ARI) foi fabricado na cidade de Esteio e transportado até Porto Alegre, numa distância de aproximadamente 40 km, para os agregados graúdos e miúdos naturais foram estimadas as distâncias de 85 km e 30 km, respectivamente, onde o agregado graúdo parte de Montenegro até Porto Alegre e o agregado miúdo é obtido na própria cidade.

#### 4.4. Materiais empregados para confecção dos concretos

Para a fabricação dos concretos com resíduos de construção e demolição (RCD) empregou-se como aglomerante o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Como agregado miúdo utilizou-se a areia retirada das margens do Lago Guaíba (RS). Como agregados graúdos foram empregados dois tipos diferentes de material: a brita de basalto e o RCD misto. A tabela 4.2 apresenta as massas específicas e as massas unitárias utilizadas para cada insumo.

Tabela 4.2 - Massas específicas e unitárias dos materiais empregados.

Material	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )
Cimento CP V ARI	3,05	1,02
Agregado miúdo	2,61	1,50
Agregado graúdo natural	2,90	1,42
Agregado reciclado misto (RCD)	2,23	1,31

Fonte: Elaborada pela autora.

Os agregados graúdos obtidos através do RCD foram lavados, britados, peneirados e estocados em local apropriado, juntamente com os agregados naturais miúdos, que são com granulometria entre 4,75 e 0,15 mm e os agregados graúdos, que são com granulometria de 19 e 4,75 mm. O módulo de finura do agregado graúdo é de 7,1 e o do agregado miúdo é de 2,56. A dimensão máxima do agregado graúdo é de 19 mm e o do agregado miúdo é 4,75 mm. Na figura 4.4 apresentam-se as curvas granulométricas dos agregados utilizados.

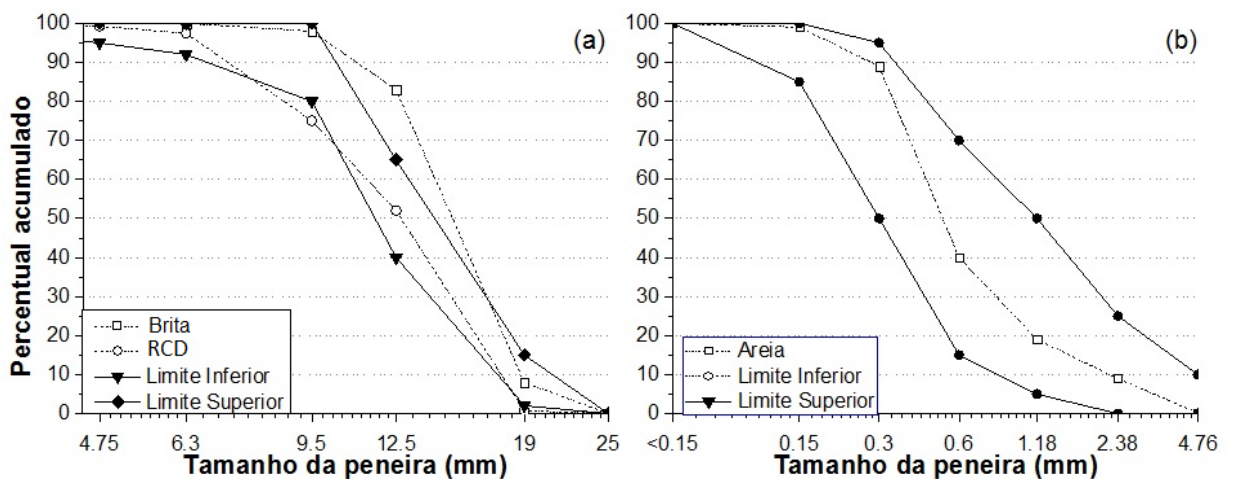


Figura 4.4 - Curva Granulométrica do agregado graúdo e do RCD (a), e do agregado miúdo (b).

Fonte: Elaborada pela autora.

Os RCD apresentam as porcentagens de materiais que foram obtidas e calculadas através da separação desses materiais em determinadas categorias: argamassa, brita e argamassa, argamassa e tinta, cerâmica, brita de origem



basáltica e cerâmica e argamassa. Essa separação do RCD foi realizada de forma visual e manual após a coleta e o transporte dos materiais para o laboratório. A figura 4.5 apresenta as porcentagens de cada material do agregado de RCD.

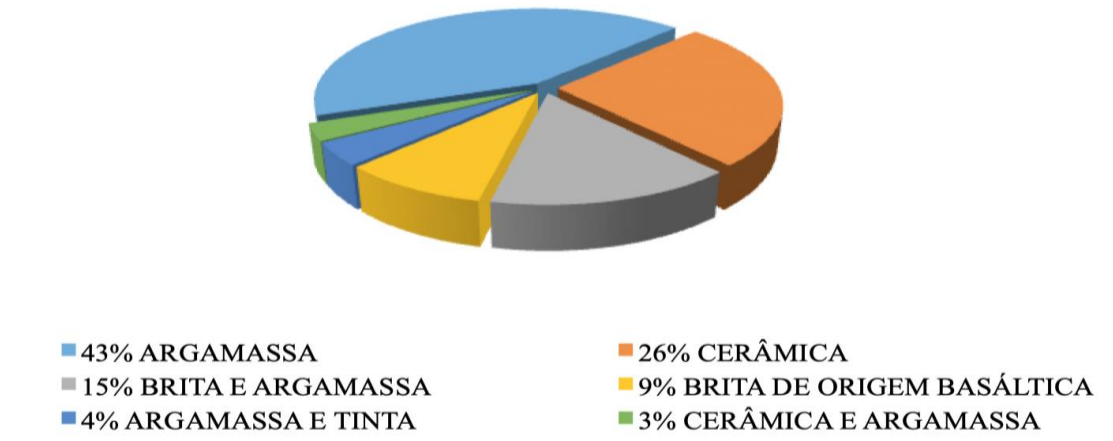


Figura 4.5 - Porcentagem da quantidade de materiais no agregado reciclado.

Fonte: Elaborada pela autora.

#### 4.5. Procedimentos de dosagem

Para a moldagem dos concretos empregou-se o método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), cujo teor de argamassa ( $\alpha$ ) foi mantido constante e igual a 53% para todas as misturas. Determinou-se que o abatimento ficaria na faixa de  $90 \pm 10$  mm, cuja quantidade de água foi ajustada experimentalmente para a obtenção dessa trabalhabilidade. Foram moldados 4 corpos de prova de 10 x 20 cm por traço, dos quais 2 foram rompidos para verificação da resistência à compressão aos 7 dias e outros 2 ensaiados aos 28 dias.

O RCD foi empregado na condição saturada com superfície seca, a fim de evitar a absorção excessiva da água de amassamento pelos agregados. Dessa forma, realizou-se a pré-umidificação do material, imergindo o mesmo em água por 24 horas antes da realização das atividades de concretagem. Algumas horas antes, o RCD era retirado da água, permitindo a secagem da água em excesso do material, para inserção na betoneira.

Em função dos diferentes valores da massa específica dos agregados graúdos, houve a necessidade de realizar a compensação volumétrica, de acordo com a Equação 1.

$$M_{RCD} = M_{AN} \times \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}}$$

Eq. 1

Onde:  $M_{RCD}$  = massa do resíduo (kg);  $M_{AN}$  = massa do agregado natural (kg);  $\gamma_{RCD}$  = massa específica do resíduo (kg/dm<sup>3</sup>) e  $\gamma_{AN}$  = massa específica do agregado natural (kg/dm<sup>3</sup>).

A fim de atender às exigências associadas com a NBR 6118 (ABNT, 2014) foram escolhidos traços que apresentassem uma relação a/c máxima igual a 0,65 e uma resistência à compressão mínima de 20 MPa, simultaneamente. Dessa forma, para a realização da ACV foi confeccionado o concreto de referência (CR), que não apresenta nenhuma substituição, e concretos com teores de substituição de 25 % (CRCD25), 50 % (CRCD50), 75% (CRCD75) e 100 % (CRCD100) de agregado graúdo por RCD (em massa), com resistência a compressão aos 28 dias igual a 32 MPa, cuja mesma foi estabelecida como aquela que atendia às exigências da NBR 6118 (ABNT, 2014) para os concretos considerando os níveis de substituição adotados. A tabela 4.4 apresenta o traço unitário e o consumo de materiais necessário para produzir 1m<sup>3</sup> de concreto.

Tabela 4.4 – Tabela de dosagem para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto com 32 MPa.

Concreto	Proporção	AN (%)	RCD (%)	Agregados (kg)			Água (l)	Cimento (kg)	a/c
	(Cimento:Areia:Brita:RCD)			Areia	Brita	RCD			
Referência	1:3,28:3,80:0,00	100	0	929,04	1074,85	0	180,61	283,02	0,64
CRCD25	1:2,39:2,25:0,75	75	25	827,87	781,29	260,43	182,89	346,84	0,53
CRCD50	1:1,66:1,18:1,18	50	50	710,72	504,72	504,72	187,12	427,59	0,44
CRCD75	1:1,06:0,46:1,37	25	75	567,69	244,36	733,09	194,23	534,55	0,36
CRCD100	1:0,96:0,00:1,74	0	100	526,25	0	951,98	192,05	547,26	0,35

Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2019).

Dessa forma, foram empregadas as quantidades de material apresentadas na Tabela 4.4 para a realização da ACV de concretos com RCD.

#### 4.6. Metodologia de Avaliação dos Impactos Ambientais

A metodologia de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) adotada foi a CML 2002, desenvolvida pelo CML (Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden), foi adotada por Domagoj (2018), Georgiopoulou e Lyberatos (2018), De Paula (2016), Serres, Braymand e Feugeas (2016) e Butera, Christensen e Astrup (2015).

Segundo Mendes (2013), o CML é um método de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV). O CML 2002 é baseado em uma abordagem *midpoint* (orientada à problemas), e neste trabalho será empregada a versão *baseline* disponível pelo SimaPro com 11 categorias de impacto, sendo elas apresentadas no quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Impactos adotados pela CML, versão *baseline*.

Impactos Ambientais	Definição	Sigla em inglês	Unidade
Depleção de recursos abióticos	Significa a redução de recursos naturais.	ADP	Sb eq/kg
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	É a redução de recursos naturais devido à extração de combustíveis fósseis.	ADP-ff	MJ/kg
Mudanças climáticas	Diz respeito às emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera.	GWP	CO <sub>2</sub> eq/kg
Depleção de ozônio estratosférico	É o aumento da quantidade de raios ultravioletas.	ODP	CFC-11 eq/kg
Toxicidade humana	Um problema ambiental causado por substâncias tóxicas ou pela poluição encontrada no ambiente humano.	HTP	1,4-diclorobenzeno eq/kg

Ecotoxicidade em águas doces	Emissões de substâncias tóxicas para água, solo e ar que geram impacto ao ecossistema de água doce.	FAETP	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade marinha	Emissões substâncias tóxicas encontradas nos ambientes marinhos.	MAETP	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade terrestre	Emissões substâncias tóxicas encontradas nos ambientes terrestres.	TETP	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Oxidação fotoquímica	É o aumento da concentração de ozônio na camada mais baixa da atmosfera devido às reações foto-catalizadas em poluentes.	POCP	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/kg
Acidificação	É o aumento do teor da acidez no ar, na água ou no solo, resultante da emissão de óxido de nitrogênio e enxofre para a atmosfera.	AP	SO <sub>2</sub> eq/kg
Eutrofização	É o aumento da concentração de nutrientes no ambiente causando o aumento do número de espécies no ecossistema	EP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq/kg.

Fonte: Adaptado de Van Den Heede e De Belie (2012).

De acordo com Mendes (2013), os indicadores de acidificação e oxidação fotoquímica tem abrangência de escala regional (Europa), os demais indicadores citados acima tem abrangência global.

#### 4.7. Análise do inventário do ciclo de vida (ICV)

Segundo Marinkovic et al. (2010) o inventário do ciclo de vida (ICV) condiz com a quantificação de entradas e saídas de acordo com a fronteira do sistema do estudo, e compreende a coleta de dados e os procedimentos de cálculo.

A elaboração dos inventários do ciclo de vida foi realizada através da transferência do levantamento de dados obtidos pelo referencial bibliográfico para o software SimaPro 9.0, assim como a seleção e adequação das informações obtidas nos bancos de dados do programa. Para este trabalho as misturas de concretos de

1m<sup>3</sup> com 32 MPa, tanto o concreto com agregado natural quanto o reciclado estão localizadas no Brasil, portanto os dados de entrada para a produção de cimento, agregados e concreto foram coletados localmente e os dados que não foram coletados no local foram obtidos através da base de dados do Ecoinvent 3.0. A quadro 4.2 apresenta os dados do processo de implementação para a modelagem dos cenários 1, 2 e 3 da ACV. O modelo foi adaptado para os fabricantes e fornecedores do Brasil.

Quadro 4.2 - Processos implementados no SimaPro 9.0 para modelar o cimento, extração natural de matéria-prima, agregado de concreto reciclado e concreto – cenário 1, 2 e 3.

Seção	Descrição	Nome do Processo	Unidade
Cimento	Consumo de clínquer	Clinker {Europe without Switzerland}  production   Cut-off, U	kg
	Consumo de cimento Portland	Cement, Portland {BR}  production   Cut-off, U	kg
	Consumo de aço	Steel, low-alloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	kg
	Consumo de gesso	Gypsum, mineral {GLO}  market for   Cut-off, U	kg
	Consumo de diesel	Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   Cut-off, U	MJ
	Consumo de eletricidade	Electricity, medium voltage {BR}  market for   Cut-off, U	kWh
	Consumo de água	Tap water {RoW}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	kg
Extração de matéria-prima (areia)	Consumo de areia	Gravel, round {BR}  gravel and sand quarry operation   Cut-off, U	kg
	Consumo de diesel	Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   Cut-off, U	MJ
	Consumo de eletricidade	Electricity, medium voltage {BR}  market for   Cut-off, U	kWh
	Consumo de água	Tap water {RoW}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	kg
Extração de matéria-prima (brita)	Consumo de brita	Basalt {BR}  quarry operation   Cut-off, U	kg
	Consumo de diesel	Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   Cut-off, U	MJ
	Consumo de eletricidade	Electricity, medium voltage {BR}  market for   Cut-off, U	kWh
	Consumo de água	Tap water {RoW}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	kg
Agregado reciclado de concreto	Consumo de agregado reciclado	Recycled aggregate (New project)	kg
	Consumo de óleo lubrificante	Lubricating oil {RoW}  production   Cut-off, U	kg

	Consumo de diesel	Diesel, low-sulfur {RoW}  production   Cut-off, U	kg
	Consumo de eletricidade	Electricity, medium voltage {BR}  market for   Cut-off, U	kWh
	Consumo de água	Tap water {RoW}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	kg
Concreto	Consumo de concreto	Concrete, 30-32MPa {BR}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Cut-off, U	m <sup>3</sup>

Fonte: Baseado em Borghi, Pantini e Rigamonti (2018).

Para confeccionar as amostras de concreto (CR), (CRCD25), (CRCD50), (CRCD75) e (CRCD100) os valores de cada insumo é obtido conforme a tabela 4.3 e para o transporte, dado do processo de implementação para a modelagem da ACV, foram utilizados diferentes tipos de transporte para cada um dos insumos utilizados para confeccionar 1m<sup>3</sup> de concreto, esses tipos de transporte são apresentados no quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Tipos de transportes implementados para a modelagem da ACV.

Seção	Descrição	Nome do Processo
Cimento	Transporte do cimento	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3   Cut-off, U
Extração de matéria-prima natural (Areia)	Transporte da areia	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}  transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3   Cut-off, U
Extração de matéria-prima natural (Brita)	Transporte da brita	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}  transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3   Cut-off, U
Agregado reciclado de concreto	Transporte do agregado reciclado	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}  transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3   Cut-off, U

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos cenários 1, 2 e 3, conforme já foi mencionado, as distâncias variam em 80km, 180km e 500km, respectivamente e por consequência disso é alterado o valor para os tipos de transportes implementados para a modelagem da ACV em relação a cada amostra de concreto CR, CRCD25, CRCD25 – 500km, CRCD50, CRCD50 – 180km, CRCD75 e CRCD100 como são representados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Distância em t×km dos materiais para as amostras de concreto nos cenário 1, 2 e 3.

Concreto Materiais	Referência (t×km)	CRCD25 (t×km)	CRCD25 – 500km (t×km)	CRCD50 (t×km)	CRCD50 – 180 km (t×km)	CRCD75 (t×km)	CRCD100 (t×km)
Cimento	0,283 t×40 km = 11,32	0,347 t×40 km = 13,87	0,347 t×40 km = 13,87	0,428 t×40 km = 17,1	0,428 t×40 km = 17,1	0,535 t×40 km = 21,38	0,547 t×40 km = 21,89
Brita	1,074 t×85 km = 91,36	0,781 t×85 km = 66,41	0,781 t×85 km = 66,41	0,505 t×85 km = 42,9	0,505 t×85 km = 42,9	0,244 t×85 km = 20,77	-
Areia	0,929 t×30 km = 27,87	0,828 t×30 km = 24,84	0,828 t×30 km = 24,84	0,712 t×30 km = 21,32	0,712 t×30 km = 21,32	0,568 t×30 km = 17,03	0,526 t×30 km = 15,79
RCD	-	0,260 t×80 km = 20,83	0,260 t×500 km = 130,22	0,505 t×80 km = 40,38	0,505 t×180 km = 90,85	0,733 t×80 km = 58,65	0,952 t×80 km = 76,16

Fonte: Elaborada pela autora.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análise de avaliação ambiental para o cenário 1

A partir dos dados gerados do ICV foi possível realizar uma comparação ambiental das diferentes amostras de concreto. Para isso foi realizada a classificação e caracterização dos indicadores de impactos ambientais que serão avaliados. A tabela 5.1 apresenta os resultados da ACV com os devidos indicadores de impactos ambientais e considerando os cinco teores de substituição de RCD nos concretos.

Tabela 5.1 - Resultados da avaliação de impacto ambiental das amostras de concreto – cenário 1.

Categoria de impacto	CR	CRCD25	CRCD50	CRCD75	CRCD100	Unidade
Depleção de recursos abióticos	1,55E-01	1,27E-01	1,25E-01	1,45E-01	1,67E-01	Sb eq/kg
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	6,55E+05	5,66E+05	5,76E+05	6,80E+05	7,68E+05	MJ/kg
Mudanças climáticas	4,37E+04	3,77E+04	3,84E+04	4,53E+04	5,11E+04	CO <sub>2</sub> eq/kg
Depleção de ozônio estratosférico	7,88E-03	6,82E-03	6,96E-03	8,21E-03	9,27E-03	CFC-11 eq/kg
Toxicidade humana	1,40E+04	1,22E+04	1,25E+04	1,47E+04	1,66E+04	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade em águas doces	4,63E+03	3,92E+03	3,92E+03	4,57E+03	5,21E+03	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade marinha	1,28E+07	1,08E+07	1,09E+07	1,28E+07	1,45E+07	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade terrestre	8,43E+01	7,57E+01	7,65E+01	8,56E+01	9,46E+01	1,4-diclorobenzeno eq/kg



Oxidação fotoquímica	8,07E+00	6,96E+00	7,08E+00	8,07E+00	9,43E+00	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/kg
Acidificação	2,17E+02	1,88E+02	1,92E+02	2,04E+02	2,56E+02	SO <sub>2</sub> eq/kg
Eutrofização	5,26E+01	4,55E+01	4,63E+01	4,89E+01	6,17E+01	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq/kg.

Fonte: Elaborada pela autora.

Pode-se observar que os valores dos impactos ambientais para a amostra de concreto com 25% e 50% de substituição do agregado natural pelo reciclado foram menores em todas as categorias de impactos ambientais, cujos os valores dos impactos ambientais da amostra com 100% de substituição foram maiores em todas as categorias de impactos ambientais. Já para a amostra CRCD75 verifica-se uma variação nos resultados, cujos mesmos dependem da categoria dos impactos ambientais. Os impactos que foram inferiores comparados com a amostra de referência são depleção abiótica, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização.

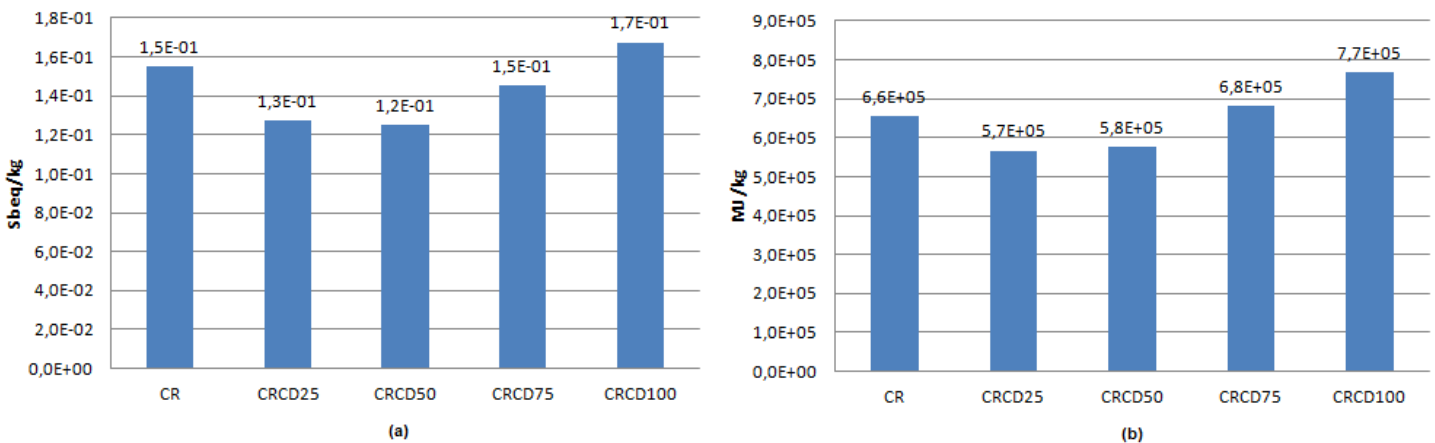


Figura 5.1 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de depleção abiótica (a) e depleção abiótica (combustível fóssil) (b) – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na categoria de depleção de recursos abióticos, os resultados do impacto ambiental nas amostras CRCD25, CRCD50 e CRCD75 são inferiores comparadas

com as CR e CRCD100, ou seja, a redução de recursos naturais devido à extração de minerais é menor nas amostras com 25%, 50% e 75% de substituição, respectivamente. Já para a categoria de depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis), teve um aumento na redução de recursos naturais devido à extração de combustíveis fósseis nas amostras de 75% e 100% de substituição. Portanto, a amostra de 25% gerou menos impacto, isto é, teve o menor valor de redução dos recursos naturais seguido da amostra de 50% e da de referência.

Os resultados na categoria de mudanças climáticas estão apresentados na Figura 5.2.

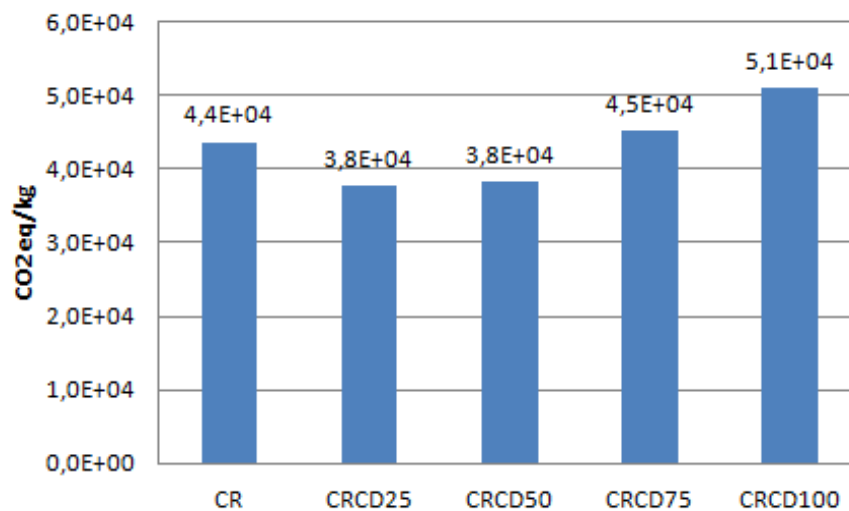


Figura 5.2 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de mudanças climáticas – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

Pode-se verificar que há menos impactos em emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera quando se utiliza a substituição do agregado natural pelo RCD nas amostras CRCD25 e CRCD50 comparadas com o CR, entretanto nas amostras CRCD75 e CRCD100 os impactos foram maiores. Pode-se dizer então que as amostras com 25% e 50% de substituição são as mais adequadas comparadas às amostras de referência, 75% e 100% em termos ambientais com relação à emissão de GEE como CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

Esta redução do impacto nas amostras CRCD25 e CRCD50 é devido ao uso do RCD em substituição ao agregado graúdo que geram de 12,2% a 13,6% menos impactos comparados com o CR. Esta afirmação se dá devido à diminuição na quantidade de agregado graúdo e com isso o transporte também é considerado menor. Mesmo havendo um aumento na quantidade de cimento, a quantidade de agregado graúdo diminui em uma proporção bem maior do que a do cimento aumenta e com isso gera essa redução dos impactos ambientais nas amostras CRCD25 e CRCD50.

Na Figura 5.3 são apresentados os resultados na categoria de depleção de ozônio estratosférico.

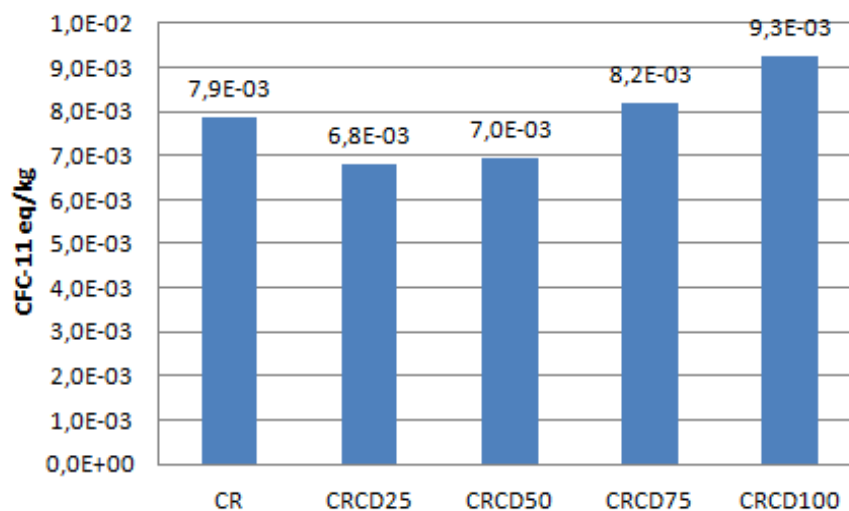


Figura 5.3 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de depleção de ozônio estratosférico – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

As amostras CRCD25 e CRCD50 liberam menos gases de clorofluorcarboneto (CFC-11) que causam a redução da camada de ozônio, pois os resultados desse impacto são menores nessas amostras em comparação com a amostra CR e as demais amostras apresentam valores superiores, porém todos os resultados são relativamente baixos e com isso a utilização do agregado neste caso se torna irrelevante.

Os resultados na categoria de toxicidade humana estão apresentados na Figura 5.4.

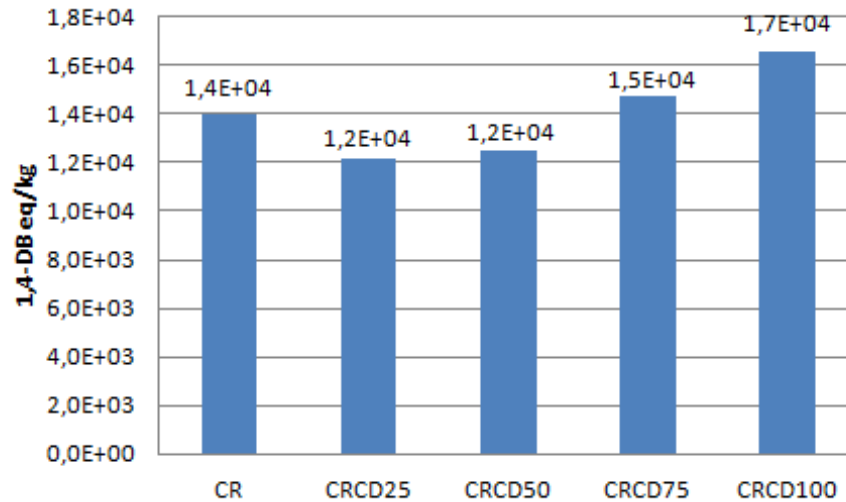


Figura 5.4 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de toxicidade humana – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

As substâncias tóxicas e poluições encontradas no ambiente humano causadas pelo impacto de toxicidade humana apresentam uma taxa em 1,4-diclorobenzeno eq/kg mais elevada nas amostras CRCD75 e CRCD100 e uma menor taxa nas amostras CRCD25 e CRCD50 em relação à CR.

A Figura 5.5 apresenta 3 gráficos de diferentes categorias de impactos ambientais, o de ecotoxicidade de água doce (a), ecotoxicidade marinha (b) e ecotoxicidade terrestre (c).

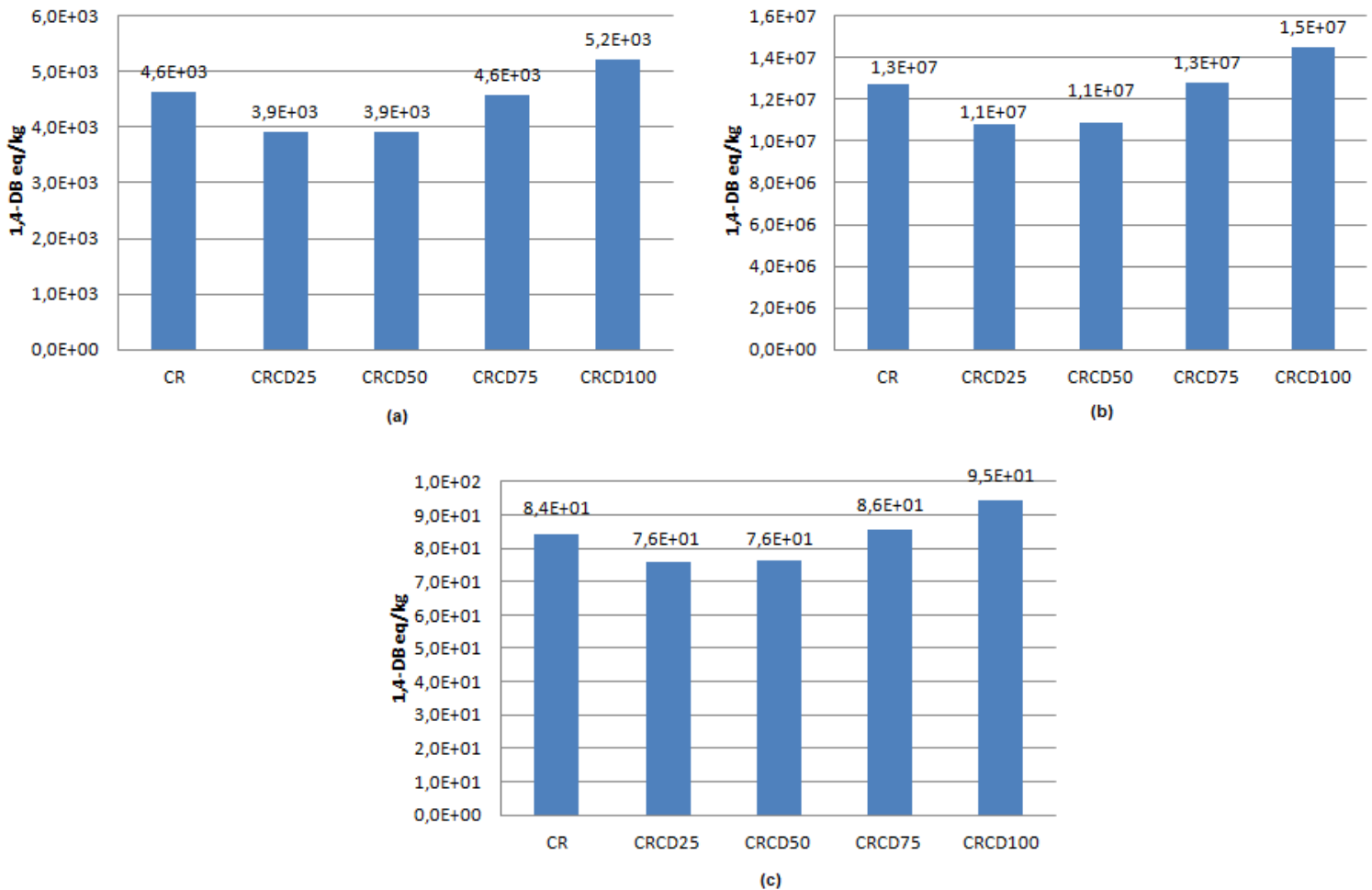


Figura 5.5 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de ecotoxicidade de água doce (a), marinha (b) e terrestre (c) – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

Nas categorias de ecotoxicidade tanto na de água doce, marinha quanto na terrestre apresentaram impactos menores para as amostras de CRCD25 e CRCD50 comparadas com as demais amostras. Esses impactos são gerados por substâncias tóxicas que afetam água doce, o ecossistema marinho e o ambiente terrestre e são expressos em 1,4-diclorobenzeno eq/kg nas três categorias. Diante dos gráficos gerados, pode-se verificar que a melhor opção para se utilizar em termos ambientais seriam os concretos com 25% e 50% de substituição do agregado natural pelo RCD.

Os resultados na categoria de oxidação fotoquímica estão apresentados na Figura 5.6.

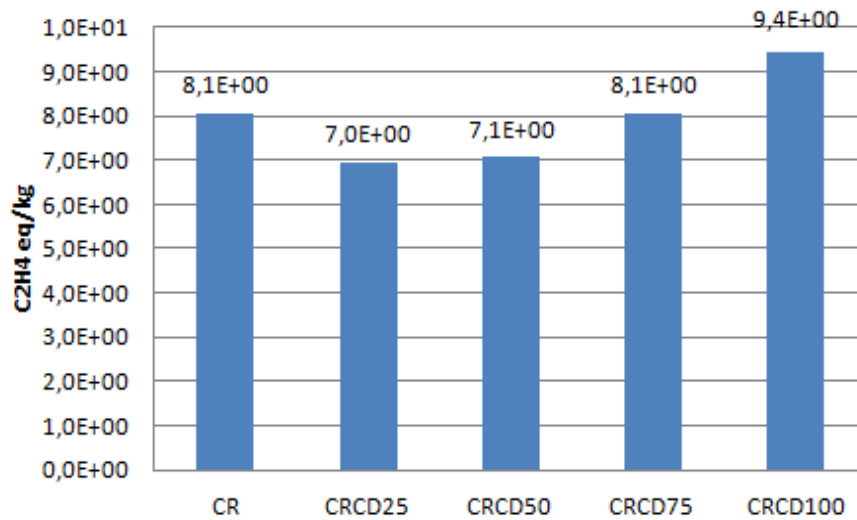


Figura 5.6 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de oxidação fotoquímica – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na categoria de depleção de oxidação fotoquímica, os resultados do impacto ambiental nas amostras CRCD25 e CRCD50 são inferiores comparadas com a amostra CR, a CRCD75 tem o mesmo valor de impacto que a CR, e a CRCD tem valores de impacto superior comparado à CR, isto é, a concentração de ozônio na atmosfera é menor nas amostras com 25% e 50% de substituição, respectivamente.

Na Figura 5.7 são apresentados os resultados na categoria de acidificação.

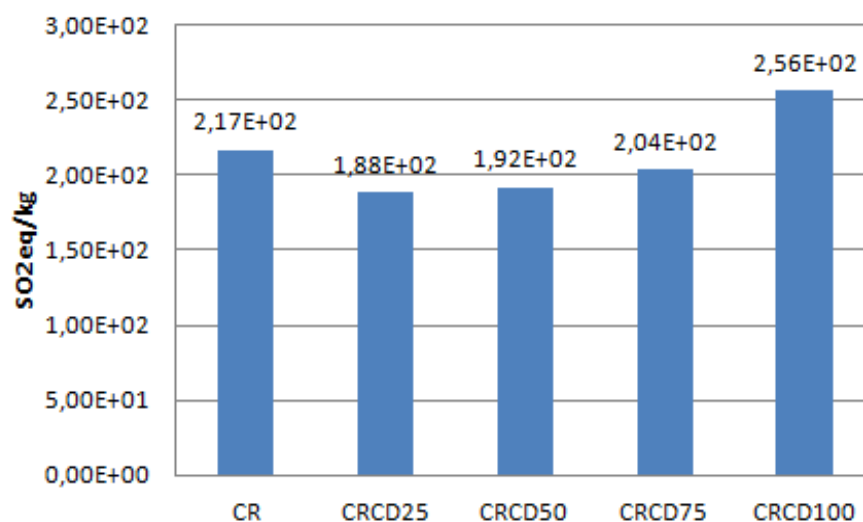


Figura 5.7 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de acidificação – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

Nas amostras CRCD25, CCD50 e CRCD75 não há um aumento no teor de acidez na água, solo ou ar tanto quanto as amostras CR e CRCD100, ou seja, os impactos nas amostras de 25%, 50% e 75% de substituição do agregado natural pelo RCD tem valores em emissões de SO<sub>2</sub> eq/kg menores comparados ao concreto de referência e o de 100% de substituição, isso causa uma diminuição do teor de acidez encontrado na água, solo ou ar referente às três primeiras amostras citadas.

A Figura 5.8 apresenta os resultados na categoria de eutrofização.

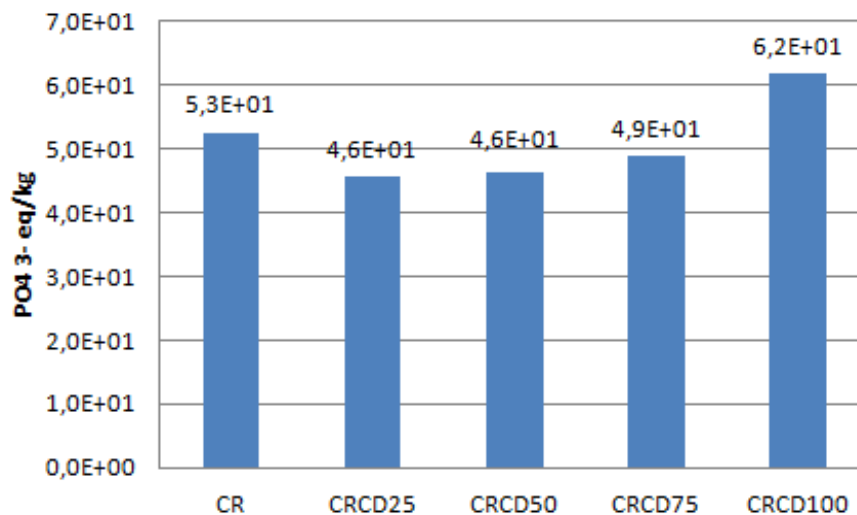


Figura 5.8 - Comparação da ACV das amostras de concreto na categoria de eutrofização – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na categoria de eutrofização, pode-se observar que para as amostras CRCD25, CCD50 e CRCD75 o aumento de espécies, o qual é causado pelo aumento de nutrientes no ambiente, é menor em relação as amostras de CR e CRCD100, isso se verifica através dos valores dos impactos ambientais gerados pela ACV.

De acordo com os resultados apresentados, a análise dos impactos

ambientais do CRCD25 é de 13,83% menor comparado com o CR, a do CRCD50 é de 12,83% menor comparado com o CR e os impactos do CRCD100 são 15,38% maiores em relação ao CR. Para as amostras CRCD25 e CRCD50 há uma redução dos impactos ambientais essa justificativa se dá devido à diminuição na quantidade de agregado graúdo e com isso o transporte também é considerado menor. Mesmo havendo um aumento na quantidade de cimento, a quantidade de agregado graúdo diminui em uma proporção bem maior do que a do cimento aumenta e com isso gera essa redução dos impactos ambientais nas amostras CRCD25 e CRCD50.

Pode-se verificar que a melhor opção entre as 5 amostras de concreto é a amostra CRCD25 em relação às questões ambientais pois ela é a que gera menos impacto ambiental na maioria das categorias de impactos ambientais, além de apresentar a mesma resistência mecânica. De uma maneira geral pode-se observar na figura 5.9 a comparação dos impactos ambientais gerados por cada amostra de concreto.

Com base nos estudos de De Paula (2016) e Serres, Braymand e Feugas (2016), observa-se que as amostras de concreto com agregados reciclados apresentam um melhor comportamento ambiental pois a maioria dos indicadores de impactos ambientais estudados são significativamente inferiores em comparação com as amostras de concreto de referência. Verificou-se também que quanto maior a classe de resistência à compressão maior será o teor de cimento e devido a isto maior será os impactos ambientais.

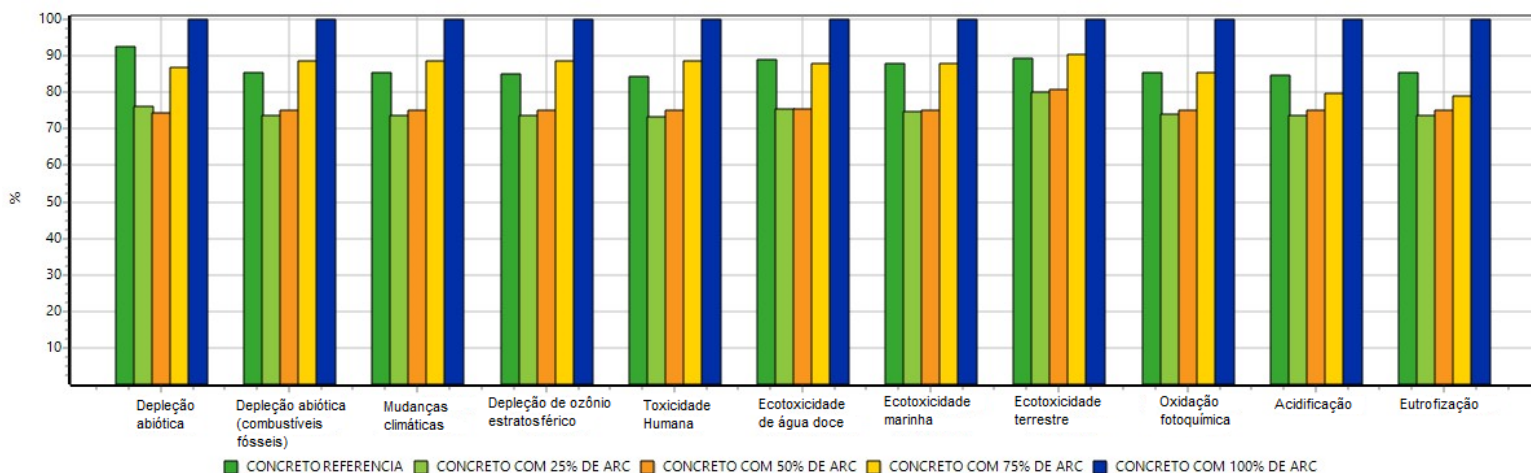




Figura 5.9 - Comparação da ACV das amostras de concretos – cenário 1.

Fonte: Elaborada pela autora.

Diante dos resultados encontrados na avaliação de impactos ambientais no cenário 1, nota-se que os resultados da maioria das categorias dos impactos ambientais das amostras de concreto de 75% e 100% de substituição do agregado natural pelo RCD são superiores aos impactos do concreto de referência, portanto não foram feitos os cenários de ACV para as amostras de concreto com 75% e 100%. Já nas amostras com 25% e 50% de substituição foi possível observar em todas as categorias de impactos ambientais que os resultados foram inferiores comparados ao concreto de referência e por esse motivo foi realizado novos cenários para a análise de sensibilidade e ACV.

## **5.2. Avaliação de contribuição dos materiais constituintes na categoria de mudanças climáticas**

No item 5.1 foram apresentadas análises individuais das 11 categorias de impactos ambientais relativos à produção das 5 amostras de concreto. Entretanto, a quantidade empregada de cada material em cada amostra de concretos é diferente e por isso é fundamental avaliar a contribuição de cada um desses materiais. Portanto, foram realizadas avaliações de contribuição dos materiais das amostras de concreto CR, CRCD25, CRCD50, CRCD75 e CRCD100 na categoria de impacto ambiental de mudanças climáticas a fim de identificar quais materiais tiveram mais influência sobre a produção de cada amostra.

Nas figuras 5.10 à 5.14 são apresentados os diagramas de processo para a produção de 1m<sup>3</sup> de concreto a partir da análise de categoria de mudança climática nas amostras de CR, CRCD25, CRCD50, CRCD75 e CRCD100, respectivamente.

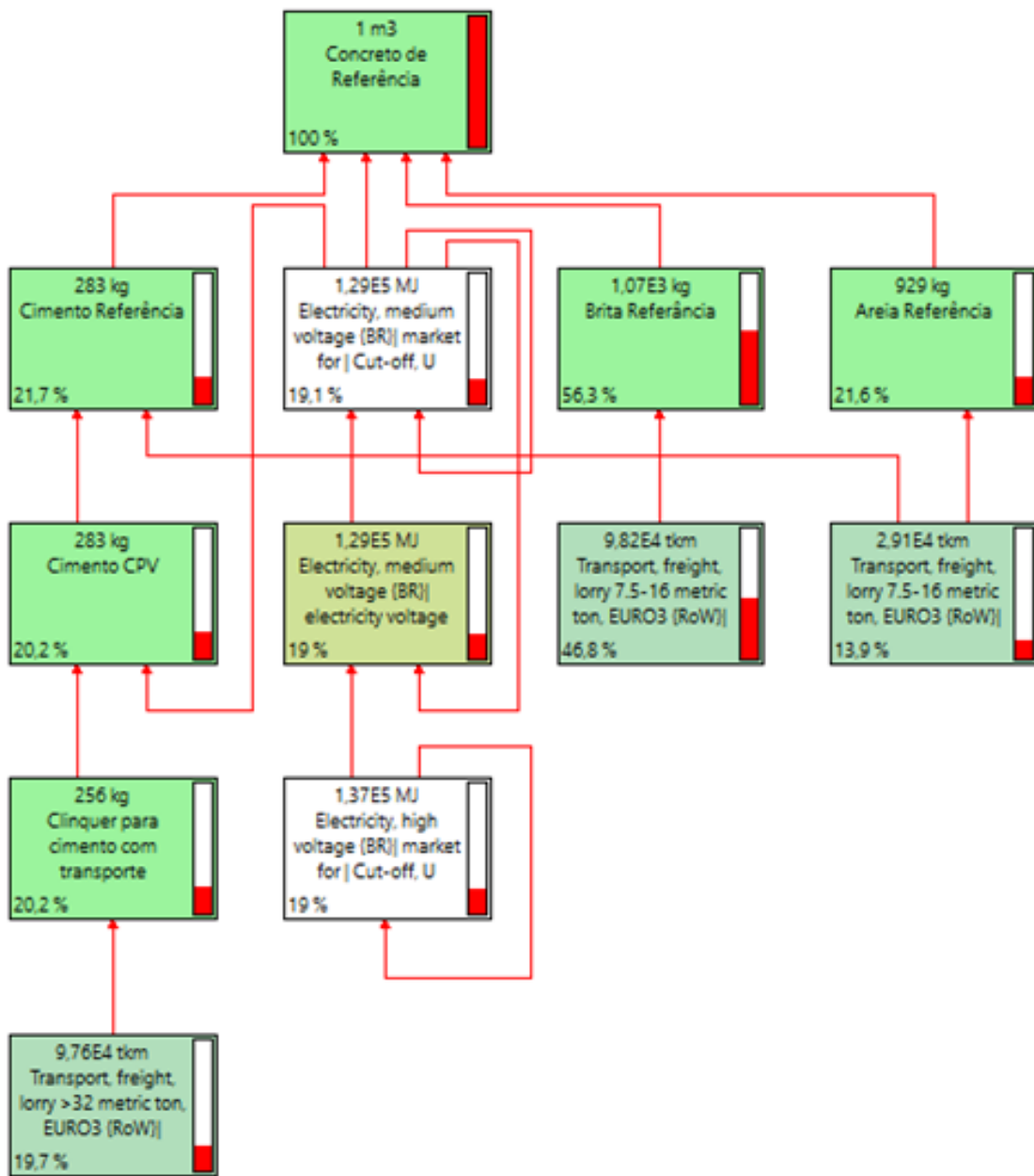


Figura 5.10 - Diagrama de processo da amostra CR.

Fonte: Elaborada pela autora.

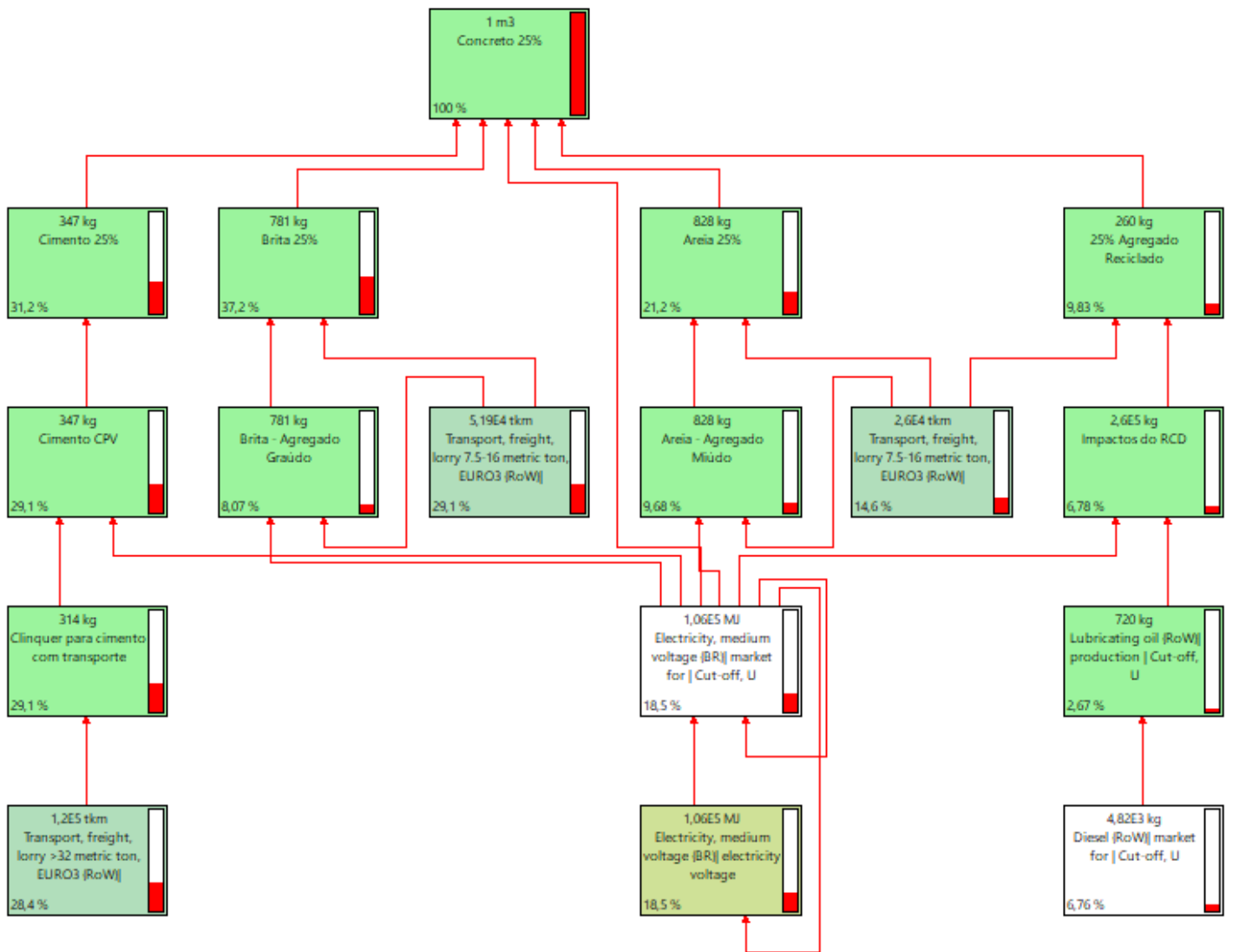


Figura 5.11 - Diagrama de processo da amostra CRCD25.

Fonte: Elaborada pela autora.

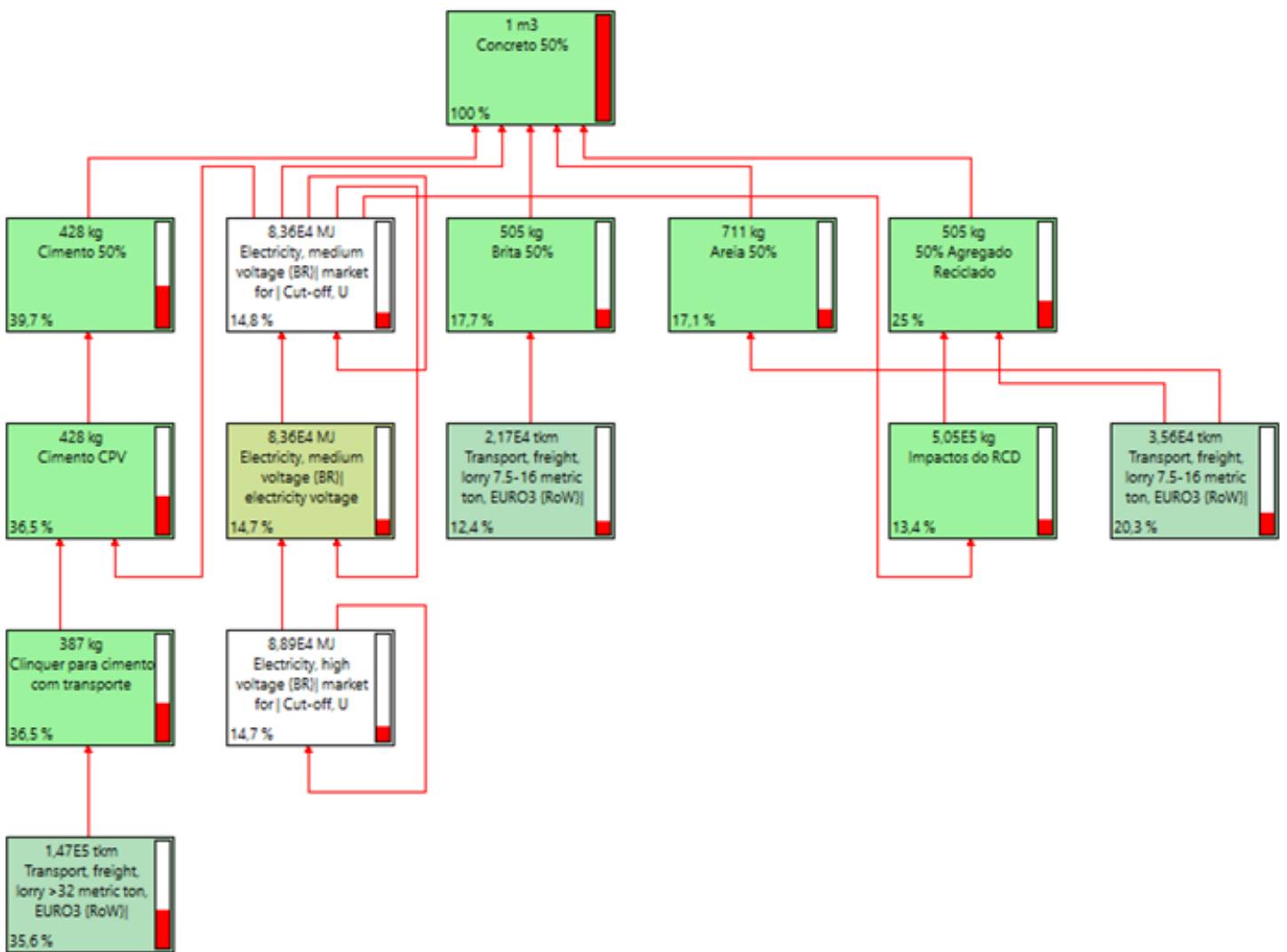


Figura 5.12 - Diagrama de processo da amostra CRCD50.

Fonte: Elaborada pela autora.

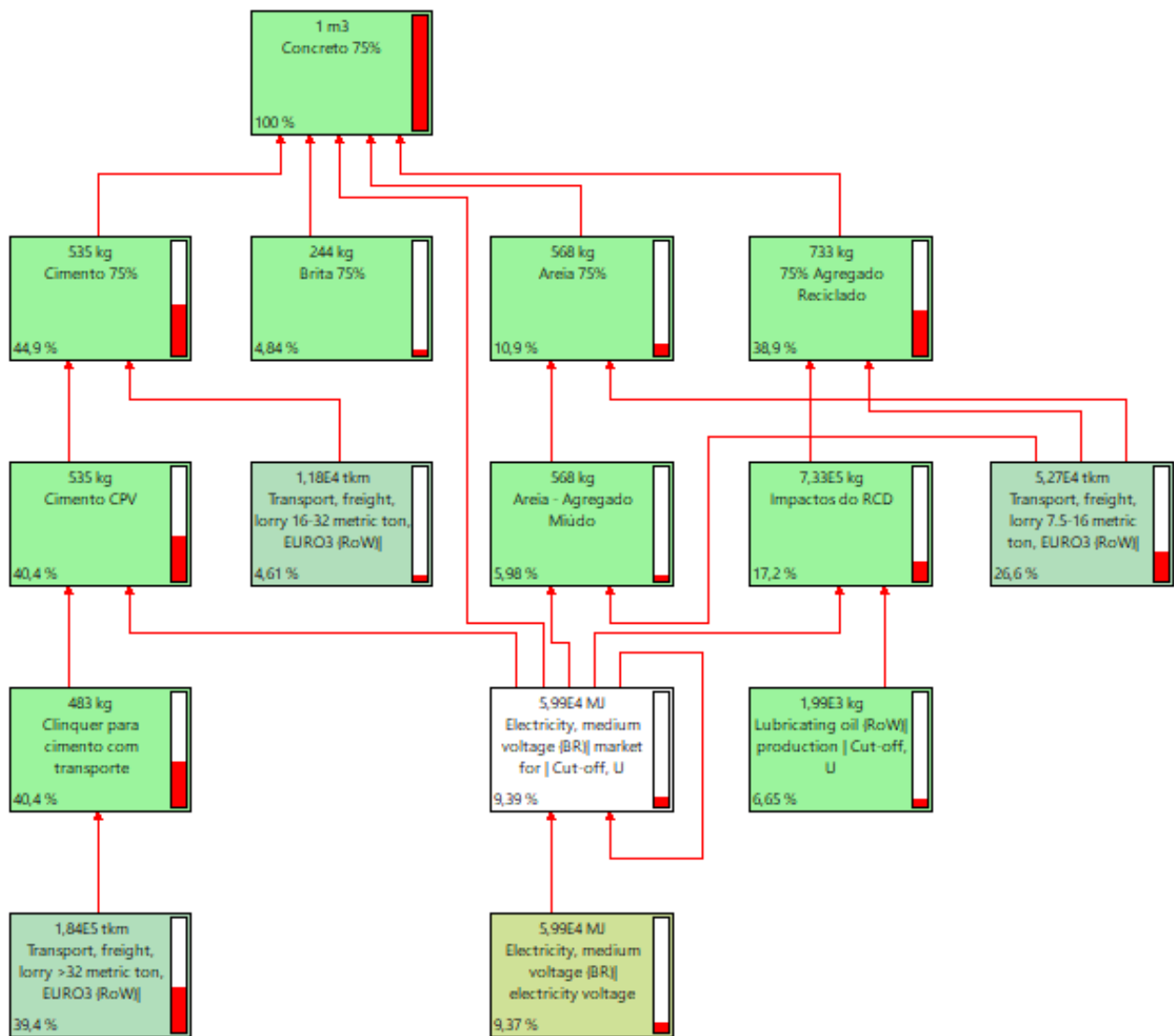


Figura 5.13 - Diagrama de processo da amostra CRCD75.

Fonte: Elaborada pela autora.

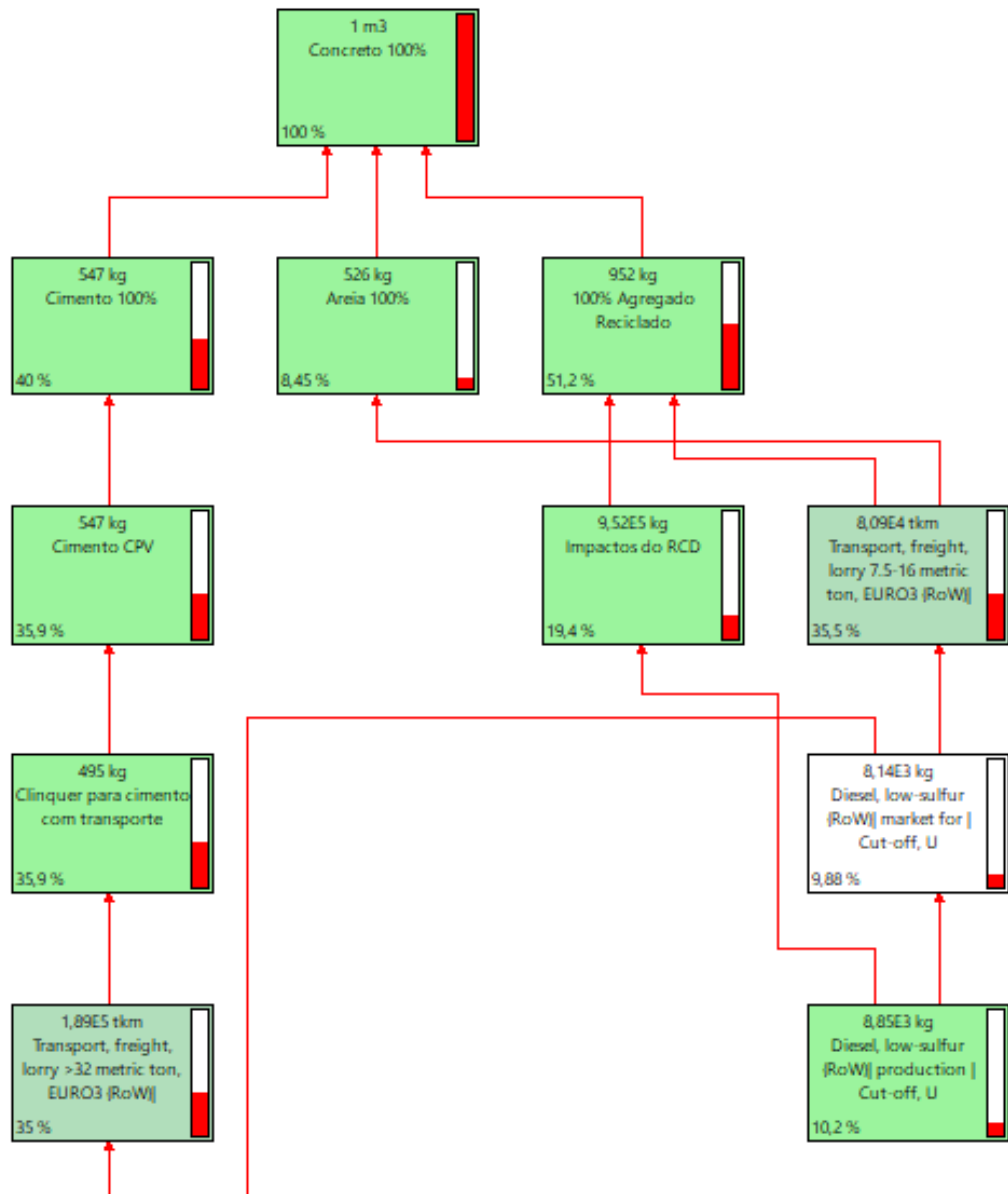


Figura 5.14 - Diagrama de processo da amostra CRCD100.

Fonte: Elaborada pela autora.

As quantidades de materiais como o cimento e o RCD aumentam e as do agregado graúdo e miúdo diminuem conforme a substituição do agregado graúdo natural pelo RCD. Pode-se observar que quanto maior é a porcentagem de substituição do agregado graúdo pelo RCD maior vai ser o impacto do material referente ao cimento e ao RCD e menor o impacto do agregado graúdo e miúdo. A água não gera impacto significativo, pois não foi considerada a distância do transporte.

Na amostra de CR, o material que gerou mais impacto à amostra de concreto foi o agregado graúdo por possuir uma maior quantidade em kg para a produção do concreto comparado com os outros materiais e foi responsável por 56,3% de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Na amostra CRCD25, a quantidade em kg de agregado graúdo diminui devido ao fato de ser 25% substituído pelo RCD e a quantidade de cimento aumenta, porém, o agregado graúdo continua sendo o material que mais gera impacto na categoria de mudança climática, com 37,2% de emissões. Na amostra CRCD50, a quantidade em kg de cimento e RCD continuam aumentando e as do agregado graúdo e miúdo diminuem, portanto, o material mais impactante passa a ser o cimento com 39,7% de todos os impactos gerados e o agregado graúdo com 25%. Na amostra CRCD75, influenciam pouco para a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera e os materiais que mais influenciam são o cimento e o RCD com 44,9% e 38,9%, respectivamente. Já na última amostra CRCD100, não há mais a presença do agregado graúdo e o material que gera mais impacto é o RCD com 51,2% das emissões seguido do cimento com 40%.

### **5.3. Análise de avaliação ambiental para o cenário 2 e 3**

#### **5.3.1. Análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade e a aplicação da ferramenta de ACV foram realizadas nos cenários 2 e 3 estipulando diferentes distâncias a fim de verificar em qual distância a utilização do RCD não seria mais benéfica em termos ambientais.

No cenário 2, para a amostra com 50% de substituição do agregado natural pelo RCD, foram estipuladas as distâncias entre 80 km a 180km a fim de substituir a distância inicial do agregado reciclado de 80 km. Já no cenário 3, para a amostra com 25% de substituição do agregado natural pelo RCD, foram estipuladas as distâncias entre 80 km a 500 km em substituição da distância de 80 km do agregado reciclado.

### 5.3.2. Distâncias Máximas

Através do item 3.2.1 pode-se concluir que as amostras de concretos com as distâncias de 180 km e 500 km nas amostras CRCD50 e CRCD25, respectivamente, apresentam impactos ambientais maiores comparados com a amostra de concreto de referência e assim são consideradas as distâncias máximas para cada tipo de amostra de concreto. A tabela 5.2 a seguir apresenta os resultados da ACV com os devidos indicadores de impactos ambientais e as amostras de concretos CR, CRCD25 – 500km, CRCD50 – 180km.

Tabela 5.2 – Resultados da avaliação de impacto ambiental das amostras de concreto – cenário 2 e 3.

Categoria de impacte	CR	CRCD25 - 500 km	CRCD50 - 180 km	Unidade
Depleção de recursos abióticos	1,55E-01	1,27E-01	1,25E-01	Sb eq/kg
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	6,55E+05	6,66E+05	6,76E+05	MJ/kg
Mudanças climáticas	4,37E+04	3,77E+04	3,84E+04	CO <sub>2</sub> eq/kg
Depleção de ozônio estratosférico	7,88E-03	6,82E-03	6,96E-03	CFC-11 eq/kg
Toxicidade humana	1,40E+04	1,22E+04	1,25E+04	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade em águas doces	4,63E+03	3,92E+03	3,92E+03	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade marinha	1,28E+07	1,08E+07	1,09E+07	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Ecotoxicidade terrestre	8,43E+01	7,57E+01	7,65E+01	1,4-diclorobenzeno eq/kg
Oxidação fotoquímica	8,07E+00	6,96E+00	7,08E+00	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/kg
Acidificação	2,17E+02	1,88E+02	1,92E+02	SO <sub>2</sub> eq/kg
Eutrofização	5,26E+01	4,55E+01	4,63E+01	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq/kg.

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme os resultados gerados da ACV na tabela após a análise de



sensibilidade no cenário 2 e 3, observa-se que os valores dos impactos ambientais para a amostra CRCD50 -180km e CRCD25 -500km, as quais tiveram as distâncias de transporte do RCD aumentadas, foram maiores na maioria das categorias de impactos ambientais.

Na distância de 180 km o CRCD50 indica impactos levemente maiores do que o CR em algumas categorias como depleção abiótica (combustíveis fósseis), mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização. E na distância de 500 km o CRCD25 indica impactos levemente maiores comparados com o CR nas categorias de depleção abiótica (combustíveis fósseis), mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização.

A análise dos impactos ambientais das amostras do cenário 2 e 3 tem os resultados em porcentagem parecidos com a amostra de referência em todas as categorias, portanto, como os resultados dos impactos ambientais foram relativamente iguais, pode-se verificar que é viável a utilização do concreto com 25% e 50% de substituição de agregado natural pelo RCD até a distâncias de 500km e 180 km, respectivamente.

Entre as 3 amostras de concretos avaliadas pela ACV a que mais tem vantagem em termos de utilização é a CRCD50 -180 devido à distância de 180km e principalmente a quantidade de substituição do agregado natural pelo RCD que está em 50%. Na figura 5.15 observa-se a comparação dos impactos ambientais gerados por cada amostra de concreto com os cenários 2 e 3.

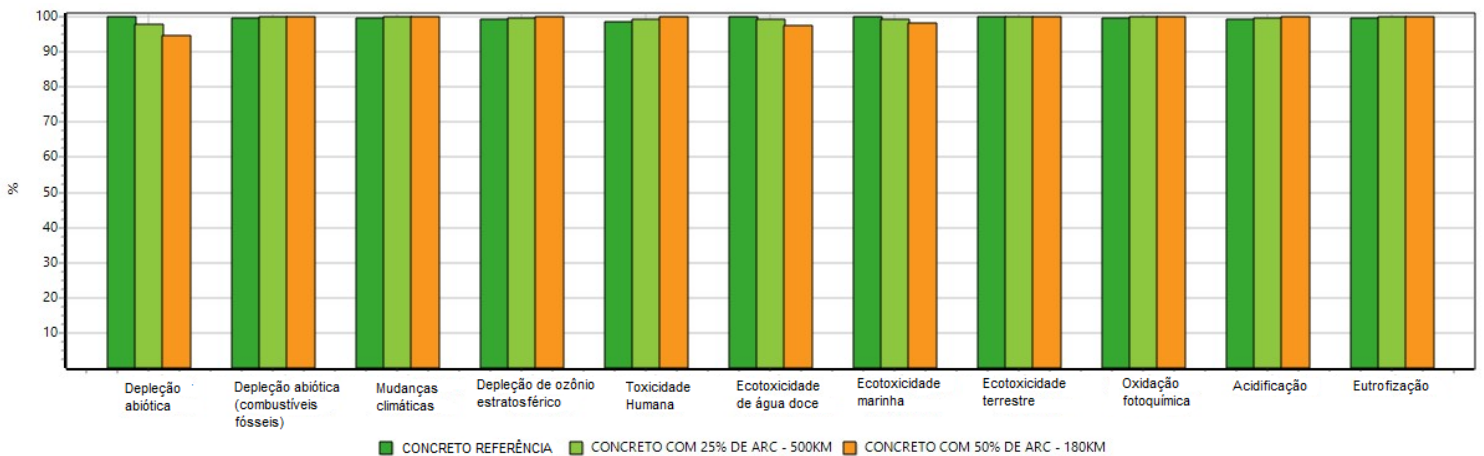


Figura 5.15 - Comparação da ACV das amostras de concretos – cenário 2 e 3.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na figura 5.16 verifica-se de uma forma geral a comparação da ACV das amostras de concretos com os cenários 1, 2 e 3 e pode-se observar que o aumento do impacto ambiental para o CRCD25 – 500km e CRCD50 – 180km comparados com as amostras CRCD25 e CRCD50 são perceptíveis na maioria das categorias de impactos ambientais, os quais já foram citados anteriormente.

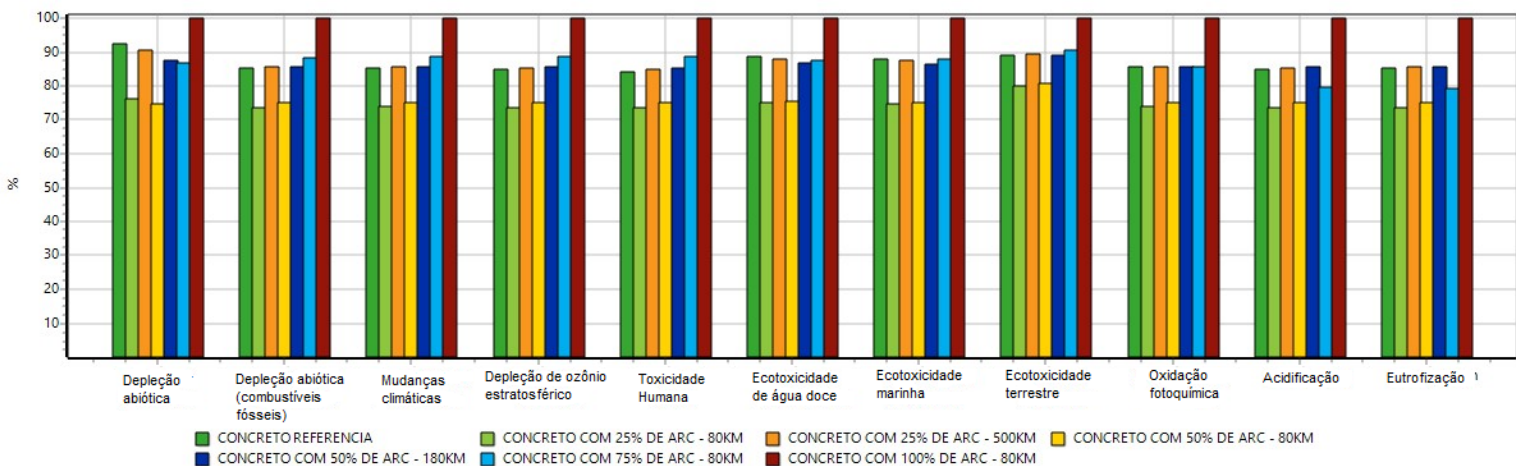


Figura 5.16 - Comparação da ACV das amostras de concretos – cenário 1, 2 e 3.

Fonte: Elaborada pela autora.

Dessa forma podemos observar que a distância utilizada para o transporte dos agregados é um fator que influencia significativamente no estudo da ACV, portanto pode-se verificar que quanto maior for a distância utilizada, maior será o impacto ambiental gerado.



## 6. CONCLUSÃO

A metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta muito utilizada para a quantificação e avaliação dos impactos ambientais de qualquer processo de produção. Nesta pesquisa, a ACV mostrou-se adequada para a avaliação comparativa entre os desempenhos ambientais dos concretos reciclados e convencionais.

A ACV foi aplicada em amostras de 1m<sup>3</sup> de concretos com 32 MPa e com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, que são provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) e foi aplicada também em diferentes cenários a fim de avaliar o impacto ambiental de cada amostra. No cenário 1 utilizou-se uma distância de 80 km de transporte do RCD, no cenário 2 e 3 foi realizada uma análise de sensibilidade, onde as distâncias dos transportes do RCD foram estimadas em 180 km para o cenário 2 e 500 km para o cenário 3.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se o software SimaPro, o banco de dados ecoinvent 9.0 e o CML como método de cálculo para avaliar os impactos ambientais de cada cenário. Alguns dados utilizados para o ICV são dados locais do Brasil.

Os resultados da ACV mostram que, nesta pesquisa, no cenário 1, as amostras CRCD25 e CRCD50 apresentaram menores impactos ambientais em todas as categorias de impacto, em média os impactos da amostra CRCD25 foram 13,84 % inferiores comparados com a amostra de referência CR e os impactos da amostra CRCD100 foram 15,83 % superiores em relação ao CR. Já no cenário 2 e 3 forma estipuladas distâncias diferentes para o agregado reciclado a fim de que

fosse possível observar em qual distância a utilização do RCD não seria vantajosa, ou seja, a que distância a utilização das amostras de concreto com esses agregados reciclados causariam mais impactos ambientais do que o concreto de referência. Em vista disso, no cenário 2 essa distância foi estimada em 180 km para a amostra CRCD50 e no cenário 3 foi estimada em 500 km para a amostra CRCD25.

Através da análise de contribuição dos materiais, observou-se que a substituição do agregado gráúdo natural pelo RCD gera um aumento de CO<sub>2</sub> pela produção do cimento e o RCD já os materiais como o agregado gráúdo e miúdo diminuem essas emissões para a atmosfera.

As amostras de concretos com agregados reciclados obtiveram pouca influência significativa nos impactos ambientais em comparação as amostras de referência. Esta verificação não leva em consideração os possíveis benefícios da não destinação dos RCD para aterros ou outras formas de disposições finais e da não extração de matéria-prima, em consequência da reutilização do RCD nas amostras de concretos.

Portanto, pode-se concluir que a pesquisa atingiu seus objetivos, realizando a avaliação ambiental do ciclo de vida das amostras de concretos, em três cenários diferentes e a análise de sensibilidade. E com isso, foi possível perceber que há um beneficiamento em algumas categorias das questões de preservação ambiental com o uso de agregado reciclado.

### **6.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Com o intuito de dar prosseguimento com as avaliações de ciclo de vida nos concretos com agregados reciclados colocam-se as seguintes sugestões:

- Calcular o custo e benefício dos concretos com empregos de RCD;
- Expandir o sistema de produto incluindo as etapas de uso e descarte “berço ao túmulo”;

- Avaliar os benefícios e aspectos críticos relacionados ao sistema de gerenciamento do RCD;
- Investigar o potencial de reaproveitamento do RCD, através de uma ACV consequencial;
- Estender as aplicações da metodologia para outros tipos de concretos realizados com materiais alternativos, além do RCD, como cinzas agroindustriais, biomassa, lodo de estação de tratamento de esgoto e rejeitos de mineração;
- A análise microestrutural da zona de transição entre pasta e agregado nos concretos com RCD;
- Realização de análises de incertezas relacionadas à etapa de manutenção em ACV.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.

ANDRADE, J. J. DE O. et al. Feasibility of using calcined water treatment sludge in rendering mortars: A technical and sustainable approach. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 13, 2019.

ARAÚJO, V. M.; CARDOSO, F. F. **Análise dos aspectos e impactos ambientais dos canteiros de obras e suas correlações** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento, 2010. Disponível em: <BT\_00544 Boletim Técnico USP.pdf>

Associação Brasileira de Norma Técnica. **ABNT NBR 6.118**: Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. 238 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

Associação Brasileira de Norma Técnica. **ABNT NBR 7.211**: Agregados para concreto - Especificações. 9 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2005 Versão Corrigida: 2019.

Associação Brasileira de Norma Técnica. **ABNT NBR 10.004**: Resíduos Sólidos - classificação. 71 p. Rio de Janeiro, 2004.

Associação Brasileira de Norma Técnica. **ABNT NBR 14.040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 21 p. Rio de Janeiro: ABNT 2009 Versão Corrigida: 2014.

Associação Brasileira de Norma Técnica. **ABNT NBR 14.044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. 46 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2009 Versão Corrigida: 2014.

BARE, J. C.; GLORIA, T. P. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 10, p. 1021–1035, 2008.

BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 27–36, 2014.

BORGHI, G.; PANTINI, S.; RIGAMONTI, L. Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 815–825, 2018.

BOVEA, M. D.; POWELL, J. C. Avaliação do ciclo de vida de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD). **Waste Management**, v. 50, p. 151–172, 2016.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica : reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. Literature review : reuse of construction and demolition waste in the. v. 61, p. 178–189, 2015.

BRAVO, M. et al. Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 818–830, 2018.

BRIBIÁN, CAPILLA, U. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011.

BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**, v. 44, p. 196–205, 2015.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 379–388, 2013.

CAYS, J. Life-cycle assessm. **Architectural Design**, v. 87, n. 3, p. 96–103, 2017.

CHAVES, Helena de Oliveira. **Diretrizes Sustentáveis na Construção Civil: Avaliação do Ciclo de Vida**. Rio de Janeiro, 2014. 58 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

CONAMA. Diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. p. 396–401, 2001.

CONTRERAS, M. et al. Recycling of construction and demolition waste for producing



new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594–600, 2016.

CUNHA, I. B. DA. Quantificação Das Emissões De Co2 Na Construção De Unidades Residenciais Unifamiliares Com Diferentes Materiais. **Dissertação Para a Obtenção Do Título De Mestre Em Engenharia E Tecnologia De Materiais**, p. 136, 2016.

DE PAULA, R. R. **Avaliação do ciclo de vida de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD)**, 2016.

DOMAGOJ, N. Environmental evaluation of concrete with sewage sludge ash based on LCA. **Sustainable Production and Consumption**, v. 16, p. 193–201, 2018.

DONG, Y. H. et al. Substituting local data for overseas life cycle inventories - A case study of concrete products in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, n. C, p. 414–422, 2015.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE. **ILCD Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. [s.l: s.n.].

FEIZ, R. et al. Improving the CO<sub>2</sub> performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 272–281, 2015.

FREGONARA, E. et al. Integrating Environmental and Economic Sustainability in New Building Construction and Retrofits. **Journal of Urban Technology**, v. 23, n. 4, p. 3–28, 2016.

GEORGIOPOULOU, M.; LYBERATOS, G. Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 224–234, 2018.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992.

INGRAO, C. et al. Life cycle inventory analysis of a precast reinforced concrete shed for goods storage. **Journal of Cleaner Production**, v. 79, p. 152–167, 2014.

LI, X.; ZHU, Y.; ZHANG, Z. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. **Building and Environment**, v. 45, n. 3, p. 766–775,

2010.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439–449, 2012.

LOTFI, S. et al. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 243–256, 2015.

MARINKOVIĆ, S. et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255–2264, 2010.

MEDEIROS, L. M. et al. Contribution of life cycle assessment to the quantification of the environmental impacts of construction systems. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 365–385, 2018.

MEDINA, C. et al. Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 216–225, 2014.

MENDES, N. C. Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. **Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção**, p. 149, 2013.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 8, p. 601–605, 2009.

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

MOREAU, V. et al. Statistical estimation of missing data in life cycle inventory: An application to hydroelectric power plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 37, p. 335–341, 2012.

OLIVEIRA, P. M.; CASTRO, C. G.; SAFAR, G. H. Softwares utilizados na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) - Uma abordagem analítica. In: **Simpósio de Engenharia de Produção**, 14., 2007. Anais... 2007, p.1-9.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 28–39, 2009.

PACHECO, J. et al. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 110–120, 2019.

PANTINI, S.; GIURATO, M.; RIGAMONTI, L. A LCA study to investigate resource-efficient strategies for managing post-consumer gypsum waste in Lombardy region (Italy). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 147, n. May, p. 157–168, 2019.

ROSADO, L. P. et al. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 634–642, 2017.

ROSADO, L. P. et al. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 477–489, 2019.

SERRES, N.; BRAYMAND, S.; FEUGEAS, F. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 24–33, 2016.

SILVESTRE, D.; BRITO, J. DE; MARGARIDA, A. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, n. 2017, p. 529–543, 2017.

STAFFORD, F. N. et al. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1293–1299, 2016.

TEKLAY, A.; YIN, C.; ROSENDAHL, L. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO<sub>2</sub> footprint from cement industry. **Applied Energy**, v. 162, p. 1218–1224, 2016.

URBANISMO, F. D. E. A. E.; MORAES, C.; SOMBRIO, D. E. O. ACV de Painéis de Blocos Cerâmicos e Concreto Armado: Um Exercício de Aplicação do Manual do ILCD, 2015.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 431–

442, 2012.

VAUGHAN, A.; NESLEN, A. Global emissions nearly stall after a decade of rapid growth, report shows. **The Guardian**, 2015.

VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; COELHO, F. Z. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 656–666, 2016.

ZHANG, Y. et al. A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 115–125, 2019.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria de Graduação  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar  
Porto Alegre - RS - Brasil  
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564  
E-mail: [prograd@pucrs.br](mailto:prograd@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)