

PUCRS

FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

IASMINY BORBA DA CUNHA

**ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE CONCRETOS COM AGREGADO
RECICLADO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

Porto Alegre

2022

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

IASMINY BORBA DA CUNHA

ENGENHEIRA CIVIL

LICENCIADA EM MATEMÁTICA

MESTRA EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**TESE PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTORA EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Junho, 2022



ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

IASMINY BORBA DA CUNHA

ENGENHEIRA CIVIL

LICENCIADA EM MATEMÁTICA

MESTRA EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ORIENTADOR: PROF. DR. JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA ANDRADE

Tese 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 Doutora em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Junho, 2022**

Ficha Catalográfica

C972a Cunha, Iasminy Borba da

Análise dos impactos ambientais de concretos com agregado reciclado de resíduos de construção civil / Iasminy Borba da Cunha. – 2022.

141 f.

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

Orientador: Prof. Dr. Jairo Jose de Oliveira Andrade.

1. Avaliação. 2. Concreto. 3. Ciclo de Vida. 4. Custo. 5. Impacto ambiental. I. Andrade, Jairo Jose de Oliveira. II. Título.



ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

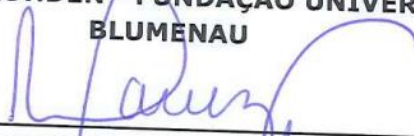
CANDIDATA: IASMINY BORBA DA CUNHA

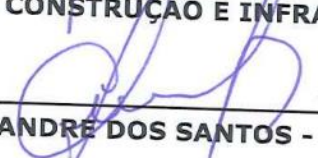
Esta tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTORA EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.


DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA


DR. ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN - FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DE
BLUMENAU


DRA. MONICA REGINA GARCEZ - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E INFRAESTRUTURA - UFRGS


DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - PGETEMA - PUCRS

*“Só quando a última árvore for
derrubada, o último peixe for
morto e o último rio for poluído é
que o homem perceberá que
não pode comer dinheiro.”*

(Provérbio Indígena)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus avôs Quina e Lenes, ao meu irmão Lucas e em especial aos meus pais Márcia e Nino Cunha.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Márcia e Nino Cunha, que foram à base de tudo para mim, apoiando-me nos momentos difíceis com força, confiança, amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los.

Ao meu irmão Lucas, agradeço pela companhia, carinho e momentos de descontração vividos a cada dia.

Aos meus avôs Quina e Lenes, pelo amor que tem comigo. Por acreditarem e torcerem sempre por mim, me incentivando em todos os momentos em que precisei.

Se chegar até aqui foi possível, foi devido ao apoio de todos vocês que são únicos.

Agradeço aos professores da Unisinos Regina Celia Espinosa Modolo e Carlos Alberto Mendes Moraes, por me darem o norte que eu precisava para iniciar essa pesquisa, a empresa SIMAPRO, por cederem uma licença estudantil, para que fosse possível realizar essa avaliação de ciclo de vida. Além disso, gostaria de lembrar que o presente resultado foi alcançado em cooperação com a Hewlett-Packard Brasil Ltda. e com recursos provenientes da Lei de Informática (Lei nº 8.248, de 1991).

Enfim, agradeço todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho. Muito obrigado!

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	7
AGRADECIMENTOS.....	8
SUMÁRIO	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE QUADROS	14
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	15
RESUMO.....	19
ABSTRACT.....	21
1. INTRODUÇÃO	23
2. OBJETIVO GERAL	27
2.1. Objetivos Específicos	27
2.2. Delimitação do Trabalho.....	27
2.3. Estrutura do Trabalho	28
3. SUSTENTABILIDADE E A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL .	29
3.1. Fundamentos de Construção Sustentável.....	32
3.2. Impactos Ambientais, Resíduos de Construção Civil e os Agregados Reciclados	33
3.2.1. Benefícios da Reciclagem dos Resíduos de Construção Civil	40
3.3. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV	43
3.3.1. Estrutura de uma Avaliação do Ciclo de Vida - ACV	45
3.3.2. Avaliação do Ciclo de Vida e os Resíduos de Construção Civil.....	50
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	56
4.1. Método de Pesquisa.....	56
4.2. Método de Trabalho	57
4.2.1. Obtenção e Processamento dos Resíduos de Construção Civil – RCC	58
4.2.2. Caracterização dos Insumos Empregados na Produção do Concreto.....	59
4.2.3. Dosagem do Concreto.....	60

4.2.4. Definição do Objetivo, Escopo, Fronteira do Sistema e Unidade Funcional da Avaliação do Ciclo de Vida	62
4.2.4.1. Metodologia de Avaliação de Impacto Ambiental	64
4.2.4.2. Inventário do Ciclo de Vida – ICV	65
4.2.4.3. Caracterização dos Impactos Ambientais da Avaliação do Ciclo de Vida.....	71
4.2.4.4. Normalização da Caracterização dos Impactos Ambientais da Avaliação do Ciclo De Vida	76
4.2.5. Análise de sensibilidade do transporte do agregado reciclado	77
4.2.6. Análise do custo de produção de 1m³ de concreto	78
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1. Caracterização dos Impactos Ambientais da Avaliação do Ciclo de Vida ..	80
5.2. Normalização da Avaliação do Ciclo de Vida	90
5.3. Contribuição dos Materiais Constituintes dos Concretos por Categoria de Impacto	93
5.4. Avaliação da Sensibilidade do Transporte e Substituição dos Agregados Graúdos pelo Reciclado	96
5.5. Avaliação de Custo para Utilização de Agregado Reciclado	99
6. CONCLUSÕES	101
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	103
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXO	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Variação entre a construção civil e o Produto Interno Bruto do Brasil entre os anos de 2004 a 2022	24
Figura 3.1 - Fluxograma do ciclo de vida dos produtos da construção civil	34
Figura 3.2 - Fluxograma das etapas para obtenção do agregado reciclado	39
Figura 3.3 – Principais impactos ambientais e sociais ocasionados durante a produção do cimento.....	42
Figura 3.4 – Fases da avaliação do ciclo de vida.....	45
Figura 3.5 – Representação do ciclo de vida de um produto	46
Figura 3.6 – Comparação entre os bancos de dados utilizados nas avaliações do ciclo de vida.....	48
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa	57
Figura 4.2 - Composição gravimétrica dos resíduos de construção civil.....	58
Figura 4.3 - Curva granulométrica dos agregados empregados no concreto.....	60
Figura 4.4 – Fronteira empregada na realização da avaliação do ciclo de vida	63
Figura 5.1 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de potencial de acidificação.....	81
Figura 5.2 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto toxicidade humana	82
Figura 5.3 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto oxidação fotoquímica	83
Figura 5.4 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto depleção do ozônio estratosférico.....	84
Figura 5.5 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de eutrofização	85
Figura 5.6 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de depleção de recursos abióticos de combustíveis fósseis	86

Figura 5.7 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de depleção de recursos abióticos	87
Figura 5.8 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de toxicidade marinha.....	88
Figura 5.9 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de toxicidade em águas doces	88
Figura 5.10 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto toxicidade terrestre.....	89
Figura 5.11 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de aquecimento global.....	90
Figura 5.12 – Comparativo normalizado entre os concretos com agregados naturais e reciclado nas categorias de aquecimento global (GWP), eutrofização (EP), depleção de recursos abióticos (ADP), combustíveis fósseis (ADP-FF) e camada de ozônio estratosférico (ODP), toxicidade terrestre (TETP), marinha (MAETP) e em águas doces (FAETP).....	91
Figura 5.13 – Contribuição dos insumos constituintes dos concretos nas categorias de impacto global	94
Figura 5.14 – Contribuição da produção e transporte dos insumos constituintes dos concretos CONREF00 (a), CONARM25 (b) e CONARM50 (c)	95
Figura 5.15 – Redução da contribuição do agregado natural com a incorporação do agregado reciclado.....	96
Figura 5.16 – Análise de sensibilidade dos concretos com agregados naturais e reciclado nas categorias de depleção de recursos abióticos (a), toxicidade em águas doces (b), aquecimento global (c), depleção de recursos abióticos combustíveis fósseis (d), depleção da camada de ozônio (e), toxicidade terrestre (f), toxicidade marinha (g) e eutrofização (h)	98
Figura 5.17 – Composição do custo do m ³ do concreto em janeiro de 2022	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Quantitativo de resíduos de construção civil coletados por regiões no ano de 2020	35
Tabela 4.1 - Ensaio de fluorescência de raio-X do cimento Portland V-ARI	59
Tabela 4.2 - Caracterização física dos agregados	59
Tabela 4.3 – Quantitativos de insumos para produzir 1m ³ de concreto para f _c = 32 MPa	62
Tabela 4.4 – Inventário do ciclo de vida para a produção de 1 tonelada de brita, areia e agregado reciclado	67
Tabela 4.5 – Distância entre o fornecedor e o local de fabricação do concreto	68
Tabela 4.6 – Quantitativo do consumo dos insumos para 1 m ³ de concreto	69
Tabela 4.7 – Índice de transporte dos insumos	69
Tabela 4.8 – Inventário do cimento CPV-ARI e dos agregados graúdo, miúdo e reciclado	70
Tabela 4.9 – Distância entre o fornecedor e o local de fabricação do concreto	78
Tabela 4.10 – Valores de mercado para os insumos utilizado na produção do concreto (transporte e matéria-prima)	79
Tabela 5.1 – Contribuição da substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado	91
Tabela 5.2 – Emissões ambientais por kg de insumos produzidos	94
Tabela 5.3 – Tonelada-quilômetro para o transporte do agregado reciclado	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Classificação dos resíduos de construção civil	36
Quadro 3.2 – Normas referentes à avaliação do ciclo de vida - ACV.....	44
Quadro 3.3 – Principais bancos de dados para ser empregados na realização da avaliação do ciclo de vida.....	47
Quadro 4.1 – Impactos ambientais da metodologia CML-2002.....	64
Quadro 4.2 – Impactos ambientais da metodologia CML-2002.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AC	Análise/Avaliação do Custo
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ADP	Depleção dos recursos abióticos
ADP-ff	Depleção dos recursos abióticos combustíveis fósseis
AICV	Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida
AP	Acidificação
APP	Área de Preservação Permanente
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARI	Alta resistência inicial
ARM	Agregado Reciclado Misto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BR	Brasil
CAT.	Categorias
CBI	<i>Conseil International du Bâtimen</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil
CML	<i>Institute of Environmental Sciences</i>
COMPL.	Compleitude
COMPR.	Abarangência
COV	Composto orgânicos voláteis
CNI	Confederação Nacional da Industria
CNUMAD	Conferência sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONARM	Concreto com agregado reciclado misto
CONREF	Concreto de referência
COP	Conferência das Nações Unidas sobre o Mudanças no Clima

CP	Cimento Portland
ECO	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
EP	Eutrofização
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EURO	Padrão Europeu de emissões
FAETP	Toxicidade em águas doce
FC	Fator de caracterização
GANAP	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
GEE	Gases de efeito estufa
GLO	Global
GWP	Aquecimento global
HTP	Toxicidade humana
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IIASA	<i>International Institute for Applied System Analysis</i>
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System Handbook</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MAETP	Toxicidade em águas marinha
METH.	Delimitação da Metodologia
MIES	<i>Mission Interministériale sur l'Effet de Serre</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MRI	<i>Midwest Research Institute</i>
NBR	Norma Brasileira
NMOVC	Composto volátil não metano
ONU	Organizações das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
POCP	Oxidação fotoquímica
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PROCONVE	Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores
RAINS	<i>Regional Air pollution Information and Simulation</i>

RCC	Resíduo de construção civil
RCD	Resíduo de construção civil e demolição
REPA	<i>Resource and Environmental Profile and Analysis</i>
ROW	Resto do mundo
RS	Rio Grande do Sul
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
TRAC.	Rastreabilidade
TERR.	Território
TETP	Toxicidade terrestre
UF	Unidade funcional
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USES	Sistema Uniforme para Avaliação de Substâncias
WCED	<i>World Commission on Environment and Development</i>
WMO	<i>World Meteorological Organisation</i>

SÍMBOLOS

%	Porcentagem
R\$	Reais
U\$	Dólar americano
α	Teor de argamassa
°C	Graus Celsius

ABREVIATURAS

a/c	Relação água/cimento
eq.	Equivalente
g/cm ³	Gramas por centímetros cúbicos
hab	Habitante
kg	Quilograma
km	Quilômetro
l	Litro
mm	Milímetro

m ³	Metro cúbico
MJ	Mega Joule
MPa	Mega Pascal
Mt	Mega Tonelada
n°	Número
p.	Página
t	Tonelada
tkm	Tonelada-quilômetro
µm	Micrómetro
±	Mais ou menos
Unid	Unidade ou unidades

RESUMO

CUNHA, Iasmíny Borba da. **Análise dos impactos ambientais de concretos com agregado reciclado de resíduos de construção civil**. Porto Alegre 2022. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A indústria da construção civil é reconhecida como uma grande consumidora de energia e recursos naturais, o que resulta na geração de resíduos sólidos e líquidos, que na maioria das vezes, são dispostos no ar, água ou solo. Essas disposições provocam desequilíbrio e contribuem para o aparecimento de diversos problemas socioambientais. Por isso, é necessário torná-la uma atividade menos impactante e para isso, devem ser empregados materiais ecológicos e soluções tecnológicas, para promover o conforto de seus moradores, o bom uso, a redução da poluição e a economia de recursos finitos. Sendo assim, o presente trabalho teve como finalidade a aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV), estabelecida pelas normas ISO 14.040 e 14.044 (ABNT, 2014), a fim de comparar os impactos ambientais entre o concreto com agregado graúdo natural (CONREF00) e com o agregado reciclado (CONARM25, CONARM50, CONARM75 e CONARM100). E para o desenvolvimento da ACV utilizou-se o software *SimaPro Faculty*, o banco de dados *Ecoinvent*, o método de cálculo CML 2002, a unidade funcional de 1 m³ de concreto com resistência de 32 MPa e a fronteira do sistema foi de uma abordagem berço ao portão, que considera o ciclo de vida do produto desde a extração de matéria-prima até a porta da fábrica. Posto isto, conclui-se que o maior contribuinte dos impactos ambientais do concreto é o cimento, seguido do agregado graúdo que ocupa de 65 a 70% da massa desse material, o que gera anualmente um consumo de 11,2 milhões de toneladas de agregado graúdo para confecção do concreto. Portanto, acredita-se que a utilização de resíduos de construção civil poderá diminuir os impactos ambientais do concreto, pois ao utilizar um resíduo como agregado deixa-se de explorar os recursos naturais. Entretanto, concluiu-se que comutar até 50% do volume do agregado graúdo trará benefícios ambientais, desde que a distância máxima para aquisição desse insumo não ultrapasse 120 km. Porém, o concreto para ser considerado sustentável, ele também deve ser economicamente viável, por isso,

foi realizada uma análise de custo dessas substituições, porém percebeu-se uma elevação (7,98%, 19,33%, 35,72% e 34,9%) no preço do m³ do concreto, devido a utilização de uma resistência mecânica fixa como unidade funcional da avaliação do ciclo de vida.

Palavras-chave: Avaliação; Concreto; Ciclo de Vida; Custo; Impacto ambiental; Resíduos.

ABSTRACT

CUNHA, Iasminy Borba da. **Analysis of the environmental impacts of concrete with recycled aggregate from civil construction waste.** Porto Alegre. 2022. PhD Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The civil construction industry is recognized as a major consumer of energy and natural resources, which results in the generation of solid and liquid waste, which in most cases are disposed of in the air, water or soil. These provisions cause imbalance and contribute to the emergence of various socioenvironmental problems. Therefore, it is necessary to make it a less impacting activity and for that, ecological materials and technological solutions must be used, to promote the comfort of its residents, good use, reduction of pollution and economy of finite resources. Therefore, the present work aimed to apply the life cycle assessment (LCA) methodology, established by ISO 14.040 and 14.044 (ABNT, 2014), in order to compare the environmental impacts between concrete with natural coarse aggregate (CONREF00) and with recycled aggregate (CONARM25, CONARM50, CONARM75 and CONARM100). And for the development of the LCA, the SimaPro Faculty software, the Ecoinvent database, the CML 2002 calculation method, the functional unit of 1 m³ of concrete with a strength of 32 MPa were used, and the system boundary was of a cradle approach. To the gate, which considers the product life cycle from raw material extraction to the “factory” door. That said, it is concluded that the largest contributor to the environmental impacts of concrete is cement, followed by coarse aggregate, which occupies 65 to 70% of the mass of this material, which generates an annual consumption of 11,2 million tons of aggregate. For making concrete. Therefore, it is believed that the use of civil construction waste can reduce the environmental impacts of concrete, because when using a waste as an aggregate, natural resources are no longer exploited. However, it was concluded that switching up to 50% of the volume of the coarse aggregate will bring environmental benefits, as long as the maximum distance for acquiring this input does not exceed 120km. However, for concrete to be considered sustainable, it must also be economically viable, so a cost analysis of these replacements was carried out, but an increase was noticed (7.98%, 19.33%, 35.72% and 34.9%) in the price of m³ of

concrete, due to the use of a fixed mechanical strength as a functional unit of the life cycle assessment.

Keywords: Evaluation; Concrete; Life cycle; Cost; Environmental impact; Waste.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades mais proventas que se tem conhecimento, e desde os primórdios da humanidade foi executada de forma artesanal, gerando como subproduto resíduos de diversas naturezas, tais como: tijolos, concreto, argamassa, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, compensados, forros, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, blocos cerâmicos, blocos de concreto e blocos de solo-cimento (LINTZ et al., 2012; NZGB, 2016).

Segundo Padovan (2013), Silva (2017) e Hoang et al. (2020), a variabilidade na composição dos resíduos de construção civil ocorre devido a diversos fatores, como a tipologia construtiva, a fase da obra, as técnicas construtivas aplicadas e os materiais disponíveis em cada região.

Caetano, Selbach e Gomes (2016) asseveram que as etapas de superestrutura e revestimento são as fases com maior geração de resíduos de construção, acumulando 81% do volume total. Trindade (2017) e Souza et al. (2022) estimam que em média 65% do material descartado é de origem mineral, 13% são madeira, 8% são plásticos e 14% são outros tipos de materiais no Brasil. Oliveira et al. (2011) afirmam que as construtoras são responsáveis pela geração de 20 a 25% desse entulho, sendo que o restante, provém de reformas e de obras de autoconstrução, dando origem ao termo popularmente conhecido como resíduos de construção e demolição (RCD).

Além disso, a construção civil é um dos setores mais importante da economia brasileira, apesar da crise que ela vem ultrapassando nesses últimos anos, conforme mostrado na Figura 1.1. Pode-se observar que entre os anos de 2004 a 2010, a construção civil chegou a representar 13,1% do Produto Interno Bruto (PIB), o que gerou um investimento de R\$ 809 bilhões e recolhimento de R\$ 180 bilhões em

impostos, além de criar empregos e renda. Porém, desde os meados do fim de 2014 o país vem enfrentando uma crise econômica, que levou esse setor a encolher 20,5%. Entretanto, em 2021 o PIB da construção civil aumentou 8%, onde acarretou a geração de 245.939 empregos. Porém, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil (CBIC), acredita que em 2022 ela perderá fôlego, e irá crescer apenas 2% o que resultará na criação de 110.000 novos postos de trabalho (COINFRA/CBIC, 2019; 2021).

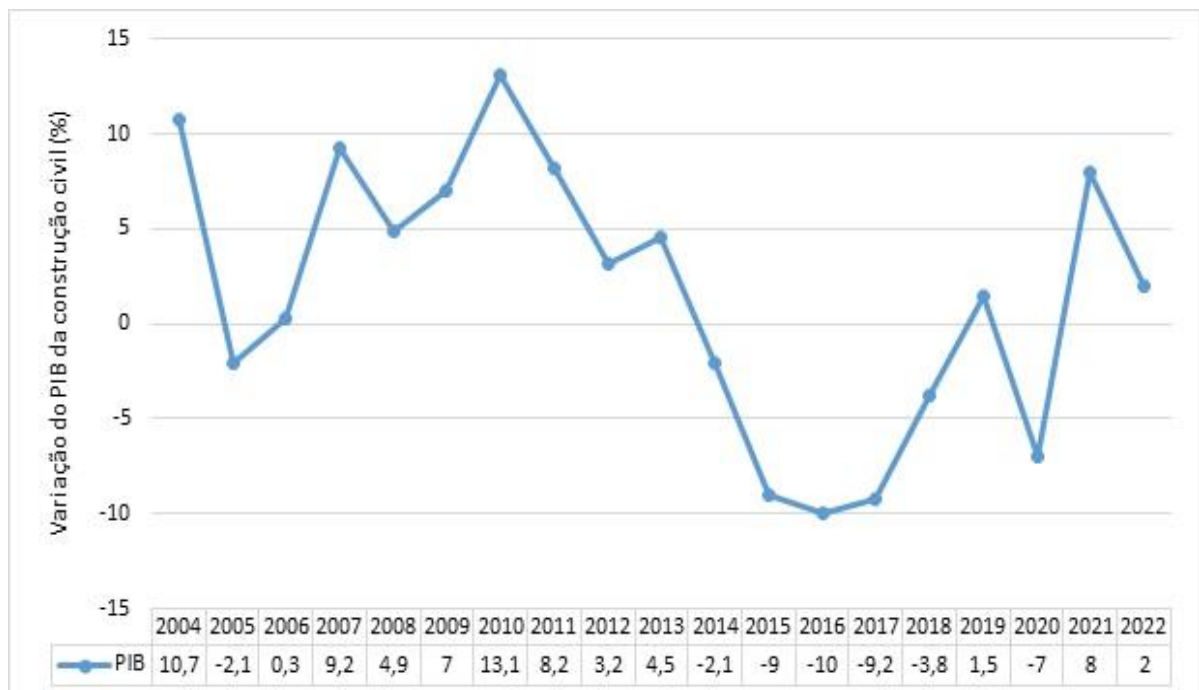


Figura 1.1 - Variação entre a construção civil e o Produto Interno Bruto do Brasil entre os anos de 2004 a 2022

Fonte: Conselho de Infraestrutura da Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil, 2019 e 2021

Apesar dessa recessão, a construção civil continua sendo responsável por uma grande parcela dos impactos ambientais, pois utiliza 50% dos recursos naturais disponíveis no planeta, emite 23% do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, consome 40% da energia total gerada e produz 52,32% da massa total de resíduos sólidos dispostos em meio urbano, sendo que esse grande volume deve-se ao fato de que praticamente todas as atividades desenvolvidas pelo setor são geradoras de entulho (BOVEA; POWELL, 2016; CUNHA, 2016; VERDAGUER; LLATAS; MARTÍNEZ, 2017; HUANG et al., 2018).

Sendo assim, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no ano de 2020 foi responsável por coletar 46.997.400 toneladas de resíduos de construção, que quando mal gerenciado, pode acarretar um desequilíbrio que contribui para o aparecimento de diversos problemas ambientais, tais como: chuva ácida, efeito estufa, aquecimento global, poluição do ar e das águas e destruição de ecossistemas, além de poder trazer riscos à saúde das populações (ZOMBINI, 2013; BLANKENDAAL; SCHUUR; VOORDIJK, 2014; ABRELPE, 2021).

Por isso, no ano de 2002 o Brasil implementou no dia 05 de julho a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (RCC), visando regulamentar a destinação e beneficiamento deles. Posto isto, ficou definido pelo CONAMA que os RCC não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de bota fora, em encostas, terrenos desocupados e em áreas de preservação e conservação ambiental. De acordo com Brasileiro e Matos (2015), o principal objetivo do CONAMA é proporcionar benefícios de ordem econômica, ambiental e social. Para tanto, umas das estratégias consiste em realizar a reciclagem e reaproveitamento desses resíduos, através do beneficiamento do RCC.

Substituir as matérias-primas utilizadas no concreto por resíduos, pode se tornar uma proposta sustentável. Sendo assim, diversos pesquisadores (BUENO, 2014; PAULA, 2016; DI MARIA; EYCKMANS; VAN ACKER, 2018, 2020; TONON, 2019; PRADHAN et al., 2019; FARINA et al., 2020; MERLO et al., 2020; AHMAD et al., 2021; MANJUNATHA et al., 2021, 2021; COLANGELO; PETRILLO; FARINA, 2021; ISLAM; SHAHJALAL, 2021; OLOFINNADE; MORAWO; OKEDAIRO, 2021; DAWOOD; AL-KHAZRAJI; FALIH, 2021) vem investigando a possibilidade da comutação dos agregados graúdos naturais, que são definidos como pedregulhos ou britas proveniente da fragmentação de rochas estáveis, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm (NBR 7.211, ABNT, 2019), pelos agregados reciclados.

Isso vem sendo proposto, pois segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), os agregados minerais são as matérias-primas mais consumidas pela construção civil, e para a sua obtenção são gerados impactos negativos a nível social,

econômico e ambiental, que muitas vezes são irreversíveis, tais como: contaminação e degradação dos cursos de água, devido ao lançamento de resíduos, transformação dos processos geológicos e do meio atmosférico, alteração dos cursos de rios, o que acarreta no assoreamento dos mesmos, desmatamento de área de preservação permanente (APP) e ainda pode intercorrer impactos com a fauna local, devido ao barulho e movimentação (MECHI; SANCHES, 2010; CUNHA, 2016; KITTIPONGVISES, 2017; AKHTAR; SARMAH, 2018; COELHO; LUCAS; SARMENTO, 2020).

Devido a todos esses impactos, nesta pesquisa os resíduos de construção civil foram alocados e beneficiados, para tornarem-se agregado graúdo que foram empregados na produção de concretos, que é o segundo produto mais consumido no mundo, porém tem um alto índice de emissão de carbono por ser um material composto produzido, com água, agregados e cimento, que apesar de ter uma pequena participação na massa do concreto, é o emissor majoritário do material, representando 85% das emissões no ciclo de vida do concreto (LIMA, 2010; TEKLAY; YIN; ROSENDAHL, 2016; KAPPEL; OTTOSEN; KIRKELUND, 2017; GEORGIPOULOU; LYBERATOS, 2018).

2. OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo realizar uma análise de sensibilidade de transporte, custo e uma avaliação do ciclo de vida comparativa entre o concreto com agregado graúdo natural e reciclado, obtido através do beneficiamento dos resíduos de construção civil, afim de encontrar um material com a mesma resistência mecânica ($f_{ck} = 32\text{MPa}$), com um menor impacto ambiental e melhor custo.

2.1. Objetivos Específicos

Para atender ao escopo da pesquisa, entende-se que é necessário satisfazer aos objetivos específicos descritos a seguir:

- Desenvolver uma avaliação do ciclo vida dos concretos produzidos com agregado natural e com agregado reciclado;
- Estabelecer a porcentagem máxima de substituição entre o agregado graúdo natural e o reciclado, nos concretos com resistência mecânica de 32 MPa;
- Avaliar a contribuição dos impactos ambientais dos insumos empregados na produção dos concretos avaliados;
- Delimitar a distância máxima para aquisição do agregado graúdo reciclado, quando comparado ao agregado natural;
- Analisar o custo da utilização do agregado reciclado na produção dos concretos, para uma resistência à compressão de 32 MPa.

2.2. Delimitação do Trabalho

A pesquisa não avaliou os impactos evitados com a reutilização dos resíduos

de construção civil, decorrentes principalmente da não disposição destes materiais em aterros ou outra destinação a qual possam ser encaminhados, nem o custo de gestão desses RCC. Além disso, não foi realizada a avaliação do ciclo de vida dos concretos considerando as etapas de operação, manutenção e demolição, delimitando-se a análise do berço ao portão.

2.3. Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos, referências bibliográficas e anexo.

O primeiro capítulo inicia com a introdução. Em seguida, no segundo capítulo são apresentados os objetivos, delimitações do estudo e a estrutura da apresentação do trabalho.

No terceiro capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica, na qual se procura fornecer uma visão geral dos tópicos de maior relevância deste estudo. Primeiramente, são apresentados os conceitos básicos relacionados a construção civil e o desenvolvimento sustentável, resíduos de construção civil e reciclagem. Em um segundo momento, são demonstradas as principais características da avaliação de ciclo de vida (ACV).

No quarto capítulo, está descrito o método utilizado. Nele, são ainda definidas todas as premissas necessárias para a avaliação do custo e ciclo de vida.

No capítulo cinco, são apresentados os resultados, de modo a possibilitar uma análise comparativa entre o agregado graúdo natural e o reciclado.

O capítulo seis apresenta as conclusões deste estudo, e sugere assuntos para serem pesquisados no futuro, que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável da construção civil.

Logo em seguida, estão anexadas as referências bibliográficas empregada para a realização dessa pesquisa.

3. SUSTENTABILIDADE E A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Taques, Souza e Alencar (2017), as preocupações da comunidade internacional com os limites do desenvolvimento do planeta iniciaram-se a partir da década de 60, quando os países passavam por uma crise ambiental de energia, recursos naturais e alimentos. Nessa época, ficou evidente que a humanidade caminhava aceleradamente para o esgotamento ou a inviabilização de recursos indispensáveis à sua própria sobrevivência.

Preocupado com essa situação, em abril de 1968 foi criado por Aurelio Peccei, o Clube de Roma, que era uma organização que reunia cientistas, pedagogos, economistas, humanistas, industriais e funcionários públicos, e tinha como objetivo alterar sobre os problemas que desafiavam a humanidade. Essas alterações, tiveram como resultado a publicação de um relatório em 1972, conhecido como: Os Limites do Crescimento (*The Limits to Growth*), elaborado por uma equipe do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que argumentava sobre a necessidade de conquistar um equilíbrio global, baseado em limites do crescimento da população, no desenvolvimento econômico dos países subdesenvolvidos e em uma atenção aos problemas ambientais. Esse relatório causou impacto entre a comunidade científica, pois apresentava cenários catastróficos de como seria o planeta, caso o padrão de desenvolvimento vigente na época permanecesse. Devido aos resultados demonstrados, nas décadas seguintes foram realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) conferências mundiais para debater questões globais, que visavam à busca de soluções para os problemas ambientais (CASTAÑEDA, 2014; WILENIUS, 2014; GERMAIN, 2020).

A primeira conferência foi realizada em junho de 1972 na capital da Suécia, em Estocolmo, e ficou conhecida como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, e contou com a participação de 113 países e mais de 250

instituições governamentais e não governamentais. Nela destacou-se que as ações humanas estavam causando uma série de degradações na natureza e criando riscos para o bem-estar e para a própria sobrevivência da humanidade. Durante a conferência foi predominante a visão antropocêntrica do mundo, na qual o homem era tido como o centro de toda a atividade realizada no planeta, desconsiderando o fato da espécie humana ser parte da cadeia ecológica que rege a vida na Terra. Tal cenário teve como desdobramento a elaboração da Declaração sobre o Meio Ambiente Humano ou Declaração de Estocolmo, cuja mesma foi baseada em vinte e seis princípios de comportamento e responsabilidade que deveriam governar as decisões relativas às questões ambientais, além da criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), cuja premissa era de que as gerações futuras e a população mundial teriam o direito incontornável de viverem em um ambiente com saúde e sem degradações (CASTAÑEDA, 2014; CUNHA, 2016; HEINRICHS, 2019).

Através dessas premissas, no ano de 1987, o conceito de desenvolvimento sustentável foi apresentado pelo *World Commission on Environment and Development* (WCED), no relatório das Nações Unidas denominado Nosso Futuro Comum ou Relatório *Brundtland*, que afirmava que o desenvolvimento sustentável, é aquele que atende às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades. Por conseguinte, o desenvolvimento sustentável deve buscar a conciliação harmônica entre eficiência econômica, ecológica e justiça social, o que ficou conhecido como Tripé da Sustentabilidade (*Triple Bottom Line*) (CASTAÑEDA, 2014; OLAWUMI; CHAN, 2018; HUMMELS; ARGYROU, 2021).

Sendo assim, a sustentabilidade tem como objetivo manter a harmonia entre os componentes, para garantir a integridade do planeta, da natureza e da sociedade no decorrer das gerações.

Preocupada com isso, a Assembleia Geral das Nações Unidas, em 1988, aprovou uma resolução, determinando a realização de outra Conferência sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), para que fosse possível aquilatar como os países vinham promovendo a proteção ambiental desde a Conferência de Estocolmo. A mesma foi realizada na cidade do Rio de Janeiro em 1992, e ficou conhecida como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento ou

ECO 92, e contou com a presença de 172 países representados por aproximadamente dez mil participantes, incluindo 116 chefes de Estado. Nela foi assinada a Declaração do Rio e a Agenda 21, além de ser criada a Convenção da Biodiversidade e das Mudanças Climáticas, que resultou no Protocolo de Kyoto, que foi assinado em 1997 e previa que as nações reduzissem a emissão de gases causadores do efeito estufa, em 5,2% em comparação com os níveis medidos em 1990, sendo seu principal alvo o dióxido de carbono. O Protocolo de Kyoto entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005, e previa que suas metas fossem atingidas entre 2008 e 2012 (CASTAÑEDA, 2014; CUNHA, 2016; KURIYAMA; ABE, 2018).

Após dez anos de sua elaboração, o Protocolo de Kyoto foi debatido na 18ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima ou COP 18, realizada em 2012 na cidade de Doha, no Catar. Através do debate entre os países presentes, foi possível perceber que as metas estabelecidas para as reduções de gases não foram atingidas. Sendo assim, ele foi estendido até o ano de 2020, pois era uma ferramenta que comprometia os países industrializados a reduzir os gases de efeito estufa (GEE) (CUNHA, 2016; KURIYAMA; ABE, 2018; BEEK et al., 2020).

Porém em 2020, quando o Protocolo de Kyoto perdeu sua validade, os países começaram a colocar em ação um novo tratado, denominado Acordo de Paris, que foi negociado e aprovado em dezembro de 2015, na COP 21, cujo objetivo é reduzir a emissão de gases de efeito estufa, diminuindo o aquecimento global e em consequência, limitar a elevação da temperatura global em 2°C até o ano de 2100 (MELE; PAGLIALUNGA; SFORNA, 2020).

Nesse contexto, na COP26 realizada em 2021 o Brasil comprometeu-se em reduzir as emissões de GEE em 50% até 2030 em relação a 2005, já que ele encontra-se na lista dos vinte maiores emissores de GEE, sendo responsável por emitir em média 2,17 bilhões de toneladas de gás carbônico equivalente (tCO_{2e}) por ano, tendo a construção civil responsabilidade por 25,6% dessas emissões, segundo o *Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre* (MIES) (SANTORO; KRIPKA, 2016; MAHMOUDKELAYE ET AL., 2018; GENIN; FRASSON, 2021).

3.1. Fundamentos de Construção Sustentável

A indústria da construção civil é reconhecida como uma grande consumidora de recursos naturais e energia, o que resulta na geração de resíduos sólidos e líquidos, que na maioria das vezes, são dispostos no ar, água ou solo. Essas disposições provocam desequilíbrio e contribuem para o aparecimento de diversos problemas ambientais, tais como: chuva ácida, efeito estufa, aquecimento global, degradação das áreas de manancial e de proteção permanente, obstrução dos sistemas de drenagem, assoreamento de rios e córregos. Por isso, surge a necessidade de tornar a construção civil uma atividade mais sustentável e menos impactante (ZOMBINI, 2013; BLANKENDAAL; SCHUUR; VOORDIJK, 2014; CUNHA, 2016; GEHLOT; SHRIVASTAVA, 2021).

Sendo assim, em novembro de 1994 foi realizada a 1ª Conferência Internacional sobre Construção Sustentável, na cidade de Tampa, na Flórida onde surgiu o conceito de construção sustentável de Charles Kilbert, que a caracterizou como a criação e o planejamento responsável de um ambiente construído e saudável, com base na otimização dos recursos naturais disponíveis e em princípios ecológicos (CUNHA, 2016; FATHALIZADEH et al., 2021).

Udomsap e Hallinger (2020), reiteram que a construção sustentável é um sistema construtivo que promove intervenções no meio ambiente, de forma a atender as necessidades de uso, produção e consumo humano, sem esgotar os recursos naturais, preservando-os para as gerações atuais e futuras. Consequentemente, ela tem por objetivo empregar materiais ecológicos e soluções tecnológicas, para promover o bom uso e a economia de recursos finitos, a redução da poluição e o conforto de seus moradores.

Posto isto, a construção civil através do conceito de sustentabilidade tenta minimizar o impacto que gera sobre o meio ambiente, atendendo de modo equilibrado a quatro requisitos básicos: adequação ambiental, viabilidade econômica, justiça social e aceitação cultural. Para isso, Fathalizadeh et al. (2021) afirmam que devem ser empregados alguns princípios básicos, discutidos na conferência, tais como: minimização do consumo de recursos naturais, a maximização da reutilização de recursos, a utilização de recursos recicláveis ou renováveis, a proteção do ambiente

natural, a criação de um ambiente saudável e não tóxico e o controle da qualidade no ambiente construído (KUCUKVAR; EGILMEZ; TATARI, 2016; AL-HAMRANI et al., 2021).

Estes princípios tornaram-se a essência do conceito de construção sustentável, e segundo Cunha (2016) eles seguem a conceituação do Conselho Internacional para a Pesquisa e Inovação em Construção (CIB) (*Conseil International du Bâtiment*), que define a construção sustentável como o processo holístico para restabelecer e manter a harmonia entre os ambientes construídos e criar estabelecimentos que confirmem a dignidade humana e estimulem a igualdade econômica (CIB; UNEP, 2002, p. 8).

Em contribuição para consolidação dessas estratégias, em 1999 o CIB publicou pioneiramente a Agenda 21, que é um documento com 2500 recomendações para implantar estratégias de conservação do planeta e estabelecer escopo para a exploração sustentável do patrimônio natural, sem impedir, porém, o desenvolvimento de nenhum país. Para a construção civil foram estabelecidas metas, tais como: reduzir a poluição, economizar o consumo de energia e água, minimizar a liberação de materiais perigosos no meio ambiente, diminuir o consumo de matérias-primas renováveis e não renováveis e aprimorar as condições de segurança e saúde dos trabalhadores e usuários, a fim de construir edificações mais seguras e saudáveis (CUNHA, 2016; CNI, 2017).

3.2. Impactos Ambientais, Resíduos de Construção Civil e os Agregados Reciclados

A indústria da construção civil é um dos setores mais importantes na economia brasileira. Porém, é responsável por uma grande parcela dos impactos ambientais, tais como: esgotamento dos recursos naturais, ruído, mudanças do uso do solo, alteração do ecossistema, comprometimento dos corpos hídrico e manancial, poluição do ar, descargas de resíduos tóxicos, ocupação de vias e logradouros públicos, proliferação de moscas, baratas, ratos e outros vetores de importância sanitária nos centros urbanos, que podem tornar-se prejudiciais à saúde humana (UTAMA; GHEEWALA, 2009; KLEPA et al., 2019; KONG; MA, 2020; CHEN et al., 2021; FATHOLLAHI; COUPE, 2021).

Por isso, é necessário torná-la uma atividade menos impactante e para isso, os arquitetos e engenheiros devem empregar em seus projetos, materiais ecológicos e soluções tecnológicas, para promover o bom uso e a economia de recursos finitos, a redução da poluição e o conforto de seus moradores, pois de acordo com Cunha, (2016) e Huang et al. (2020), esse é um setor circunspecto por um produto com longa vida útil, que vai desde a extração, o processamento da matéria-prima, a manufatura, o transporte, a distribuição, o uso, o reuso, a manutenção, a reciclagem e a disposição final dos materiais de construção, conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.1.

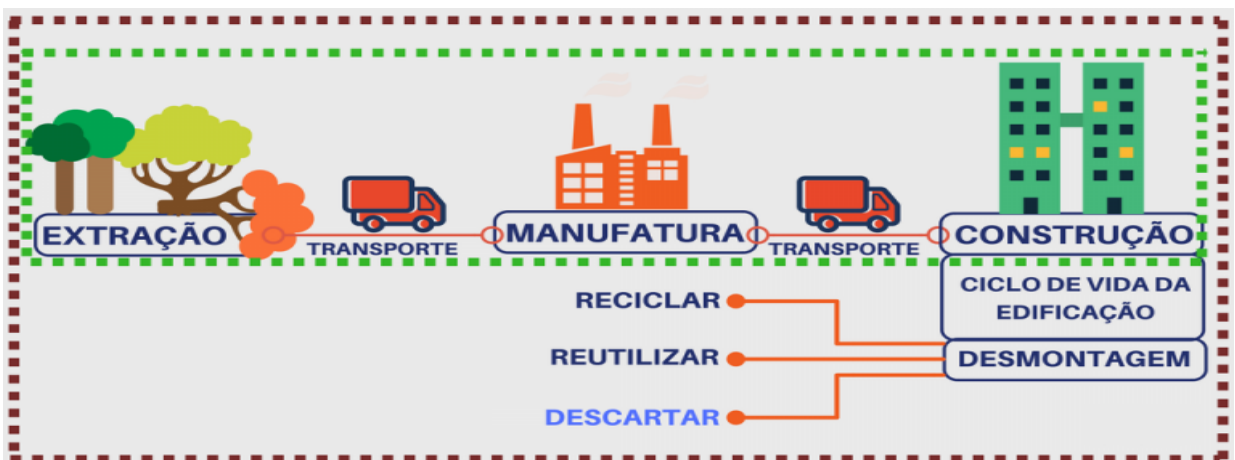


Figura 3.1 - Fluxograma do ciclo de vida dos produtos da construção civil

Fonte: Adaptado de Huang et al., 2020

Por ter um longo ciclo de vida, a construção civil é responsável pela geração de uma grande quantidade de resíduos, que de acordo com Menegaki, Damigos (2018) e Wang et al. (2019) pode chegar a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos (RSU) nos países subdesenvolvidos e 30% nos países desenvolvidos. Sendo assim, anualmente a construção civil gera aproximadamente 3,5 bilhões de toneladas de resíduos e seus principais países contribuintes são a China, responsável por 2,36 milhões de toneladas, os Estados Unidos que produz cerca de 534 milhões de toneladas e a Índia que redundaram 530 milhões de toneladas de RCC por ano. Enquanto isso, a União Europeia que é composta por 28 países foi responsável por corporificar 871 milhões de toneladas de resíduos de construção (AKHTAR; SARMAH, 2018; RUIZ; RAMÓN; DOMINGO, 2020; CHEN et al., 2021).

Desse conglomerado de países, o maior contribuinte anual na geração de RCC é a França, responsável por produzir 349 milhões de toneladas, seguida pela

Alemanha com uma geração média de 200 milhões de toneladas de RCC. Na sequência vem o Reino Unido, com uma produção de 90 milhões de toneladas, os Países Baixos com um volume de 81 milhões de toneladas, seguido pela Itália, com uma geração de aproximadamente 40 milhões de toneladas de RCC. Enquanto isso, na Áustria foram gerados cerca de 35 milhões de toneladas e na Espanha produziu-se cerca de 30 milhões de toneladas de RCC (LOTFI et al., 2015; HUANG et al., 2018; GHAFAR; BURMAN; BRAIMAH, 2020).

No continente asiático, seguido da China os maiores geradores de resíduos de construção são o Japão, responsável por produzir 77 milhões de toneladas, e a Coreia do Sul que produz 68 milhões de toneladas de RCC e a África do Sul, que gera mais de 21 milhões de toneladas de RCC anualmente (BRASILEIRO; MATOS, 2015; AKHTAR; SARMAH, 2018; WANG et al., 2019).

Já o Brasil, que é considerado um país em desenvolvimento no ano de 2020, produziu aproximadamente 46.997.400 toneladas de RCC, o que equivale uma coleta per capita de 221,19 kg por habitante, conforme apresentado na Tabela 3.1. Matias (2020) e a Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil afirmam que desse montante a construção de novas edificações, reformas, ampliações e demolições foi a maior contribuinte na geração de RCC.

Tabela 3.1 - Quantitativo de resíduos de construção civil coletados por regiões no ano de 2020

Região	Coleta Total (t/ano)	Coleta per capita (kg/hab/ano)	%
Norte	1.812.955	97,09	3,86
Nordeste	9.046.890	157,68	19,25
Centro Oeste	5.270.965	319,38	11,22
Sudeste	24.496.975	275,21	52,12
Sul	6.369.615	210,97	13,55

Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2020

Padovan (2013), Silva (2017) e Hoang et al. (2020) discutem que a composição desses RCC irão variar de acordo com as tecnologias, técnicas e culturas construtivas de cada país.

No Brasil, estima-se que em média 65% do material descartado é de origem mineral, 13% são madeira, 8% são plásticos e 14% são outros tipos de materiais (TRINDADE, 2017; SOUZA et al., 2022). Bergsdal, Bohne e Brattebo (2007) relatam que o resíduo de construção mais popular em Oslo é a madeira, um dos materiais mais empregados na Noruega devido à sua capacidade de produzir calor. Entretanto, no Vietnã 42% dos RCC são de solo escavado, seguido do concreto e tijolos com argamassa, que de acordo com Ding e Xiao (2014) são os maiores componentes dos RCC em Xangai. Na Flórida, nos Estados Unidos, tem-se que os maiores quantitativos de RCC são os 11% de drywall de acordo com Cochran et al. (2007). Na cidade da Galiza (Espanha), Lage et al. (2010) afirmam que 45% dos RCC são decorrentes da aplicação de pisos, revestimentos de parede e coberturas de cerâmicas, e nas cidades de Deli, Mumbai e Calcut, na Índia, Nithya e Ramasamy (2021) afirmam que 36% dos RCC são composto por solo, areia e cascalho.

Sendo assim, os resíduos provenientes de atividades construtivas geralmente são heterogêneos que se apresentam na forma sólida, constituídos de materiais com características físicas variáveis, que dependem da natureza das matérias-primas e das atividades associadas com o processo gerador. No entanto, Akhtar e Sarmah (2018) afirmam que os RCC são classificados segundo características em função do seu aproveitamento, uso e sua identificação quanto à saúde da população. Porém a Resolução nº 307 de 2002 do CONAMA, divide no Brasil os resíduos de construção civil em quatro categorias diferentes, conforme mostrado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Classificação dos resíduos de construção civil

Classe	Características
Classe A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, oriundos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, componentes cerâmicos (tijolos, blocos e telhas), argamassa e concreto, bem como derivados de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concretos (blocos, tubos e meios-fios) produzidos nos canteiros de obras. Estes resíduos devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem.
CLASSE B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos papel/papelão, metais, vidros, madeiras, gesso, entre outros, que devem ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem.

Quadro 3.1 - Classificação dos resíduos de construção civil (Continuação)

Classe	Características
CLASSE C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação.
CLASSE D	Resíduos perigosos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Fonte: Resolução nº 307 de 2002

Conseqüentemente Salvi (2020), afirma que eles são identificados como materiais inertes, por isso, podem ser empregados em substituição aos agregados naturais, como vem ocorrendo desde o Império Romano, onde foram reutilizados os resíduos minerais na construção de novas moradias. Porém, o maior reaproveitamento ocorreu após a Segunda Guerra Mundial, na reconstrução das cidades europeias, que tiveram suas edificações totalmente demolidas e os escombros resultantes foram britados para produção de agregados, visando atender à demanda na época. Assim, pode-se dizer que a partir de 1946 deu-se início ao desenvolvimento da tecnologia de reciclagem dos resíduos da construção civil, que tinha como principais objetivos diminuir a necessidade de áreas de destino (aterros sanitários), impedir a exploração de matérias-primas não renováveis e minimizar os danos ambientais causados pela sua extração, incluindo o extenso desflorestamento, poluição do ar e da água (GUO et al., 2018; ZHANG et al., 2019).

Segundo Zhang et al. (2019) a China, uma das maiores economias globais, possui uma taxa de reciclagem de 5% e os Estados Unidos 70%. Enquanto isso Tam, Soomro e Evangelista (2018) afirmam que países europeus, tais como: Dinamarca, Alemanha, Holanda e Reino Unido possuem uma taxa de recuperação de RCC superior a 65%. Porém na Finlândia, Portugal, Espanha e Suíça, a taxas de reciclagem estão inferiores a 30%, longe das metas que tinham sido estabelecidas para o ano de 2020 que era de 70%.

Santos e Tubino (2021), afirmam que no Brasil atualmente são reciclados 6,14% dos RCC. Entretanto, esse valor deveria aumentar, pois de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2020) a indústria da construção civil foi responsável por consumir 580 milhões de toneladas de agregados no ano de 2020, sendo 340

milhões de agregados miúdos e 240 milhões de agregados graúdos. Desse montante, 26,9 milhões de toneladas foram empregadas na confecção do concreto, já que em seu volume eles ocupam de 65 a 70% da massa desse material (POULIKAKOS et al., 2017; VALVERDE, 2020; ALMEIDA et al., 2020).

No Brasil a extração dos agregados miúdos ocorre através do desmonte ou dragagem hidráulica em leitos submersos, e os agregados graúdos são obtidos pelo desmonte de diferentes tipos de rochas e de processos de beneficiamento, o que acarreta em impactos antrópicos positivos na economia local devido a geração de empregos e impostos, que acabam sendo revertidos em serviço à população, e impactos negativos na área ambiental, tais como: supressão da vegetação, principalmente da mata ciliar que tem como função preservar o ambiente ao redor de rios e redes de drenagem, modificação da paisagem local, alteração na calha dos cursos d'água, instabilidade de margens e taludes, turbidez da água e lançamento de efluentes (VEDRONI; CARVALHO, 2008; VALVERDE, 2020; VISINTIN; XIE; BENNETT, 2020; NASIER, 2021).

Na tentativa de conter os danos ambientais ligados à extração dos agregados naturais, vários esforços de pesquisadores têm convergido para a utilização de agregados reciclados. Patil e Sathe (2021) realizaram um estudo que examinava a viabilidade do uso de cinzas volantes e escória granulada em blocos de pavimentação, e perfizeram que ao utilizar 55% da escória granulada foi possível reduzir 30% do consumo de cimento, e ao utilizar 25% de cinzas volantes e 75% de escória, obteve-se um material com melhores propriedades de compressão, tração e flexão. Enquanto isso, Hossiney et al. (2020) avaliaram a possibilidade de usar na produção de blocos de pavimentação de concreto, resíduos de pavimentos asfáltico, cujos autores concluíram que ocorre uma redução na resistência à compressão e à abrasão, encontrando-se assim um bloco para uso em instalações sem tráfego veicular e 25,8% mais econômico que os encontrados no mercado. Em contrapartida, Kurad et al. (2017) desenvolveram um estudo para analisar os efeitos da utilização de cinzas volantes e agregados reciclados de concreto no concreto, e perceberam que as combinações ótimas em termos de resistência e impacto ambiental foram aquelas realizadas conjuntamente, pois a cinza volante age como um ligante pozolânico que foi otimizado pela composição química dos resíduos de construção civil, empregados no beneficiamento dos agregados reciclados.

Sendo assim, os agregados reciclados são definidos como materiais granulares provenientes do beneficiamento, e apresentam aspectos e características técnicas para serem aplicados em obras de edificação, infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia, e de acordo com a NBR 15.116 (ABNT, 2021), eles podem ser agregados reciclados de concreto (ARC), que são aqueles obtidos do beneficiamento de resíduos de construção civil da classe A composto em sua fração graúda de no mínimo 90%, em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas ou agregados reciclados mistos (ARM), que são aqueles que possuem menos de 90% de materiais cimentícios e rochas em sua composição.

Para sua obtenção, os resíduos de construção e demolição passam por um processo de reciclagem que está distribuído em quatro etapas, conforme apresenta o fluxograma da Figura 3.2 (SILVA, 2005; GRABASCK, 2016; SILVA; MAUÉS, 2021).

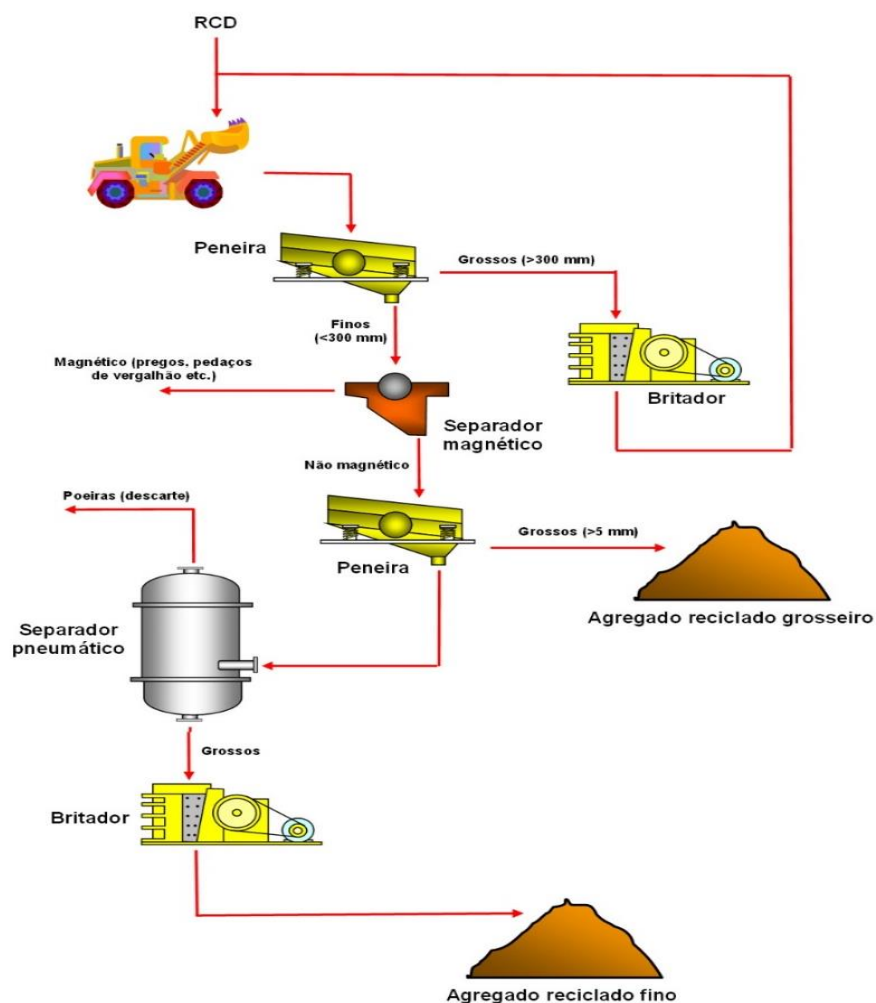


Figura 3.2 - Fluxograma das etapas para obtenção do agregado reciclado

Fonte: Barros, 2005

A primeira etapa consiste no depósito dos resíduos em pátios pré-estabelecidos, conforme o teor de impurezas ou o tipo predominante. Behera et al. (2014) reiteram que a separação é necessária para garantir um melhor desempenho nas propriedades do material que será obtido. Em seguida vem à etapa de triagem, na qual ocorre a retirada dos metais ferrosos por eletroímã e a remoção manual dos materiais restantes, cuja a mesma pode ocorrer antes ou depois da britagem. Além disso, os materiais leves podem ser separados com o uso de peneiras planas, jatos de ar ou de água ou pela imersão dos resíduos. A terceira etapa é a britagem, que é o procedimento mais importante da reciclagem, pois influencia na forma, na resistência e na granulometria dos grãos dos agregados reciclados, e é comumente realizada com o uso de britadores de mandíbula ou/e de impacto. E por último é realizado o peneiramento, cujas as partículas são separadas por tamanho a partir de peneiras ou classificadores, obtendo-se assim os agregados reciclados miúdos, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m e os agregados reciclados graúdos, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm (NBR 7211: 2019; NBR 15.116:2021).

3.2.1. Benefícios da Reciclagem dos Resíduos de Construção Civil

De acordo com Tam, Soomro e Evangelista (2018) aproximadamente 90% dos RCC poderiam ser reciclados. Por isso, inúmeras pesquisas apontam caminhos para o seu reaproveitamento, pois acredita-se que uma política de gestão de resíduos poderia minimizar as emissões globais de CO₂ em até 15%, além de agregar valor a um material que seria descartado (FERDOUS et al., 2021).

Ge et al. (2015), Rahman et al. (2015), Arshad, Ahmed (2017), Yang, Lim (2018) e Yu et al. (2019) realizaram estudos para empregar os agregados reciclados, como base e sub-base de pavimentos rodoviários. De forma geral os autores concluíram que ocorreu uma queda no desempenho mecânico, pois de acordo com Lotfy e Al-Fayez (2015) eles apresentam menor densidade, maiores valores de absorção de água, menor resistência ao impacto e à abrasão. Nwakaire et al. (2020) acreditam que a natureza da fonte e a presença de microfissuras originadas durante o processo de britagem, entre outros fatores, afetam nas propriedades dos agregados reciclados.

Entretanto, Echevarria et al. (2020) concluíram que pode-se substituir até 50% dos agregados naturais pelo agregado graúdo reciclado, o que irá contribuir para minimizar os impactos da indústria da construção de rodovias, que segundo Saberian et al. (2020) é responsável por 25% do consumo global dos combustíveis fósseis e por emitir cerca de 30% dos gases do efeito estufa.

Enquanto isso, Rocamora, Guzmán, Marrero (2016), Bravo et al. (2018) e Jesus et al. (2021) reiteram que os agregados reciclados podem ser utilizados em substituição aos agregados naturais durante a produção de argamassas e concretos, porém eles apresentam menor densidade de partículas, maior absorção d'água e massa específica aparente mais baixa, o que resulta na diminuição da resistência mecânica do concreto e eleva a profundidade de carbonatação. Por isso, Tam, Tam (2006), Xiao et al. (2012), Abd Elhakam, Mohamed, Awad (2012), Özalp et al., (2016) e Ahmad et al. (2021) recomendam um teor de substituição de até 30% da massa total dos agregados naturais. Porém, Yazdanbakhsh et al. (2018) afirmam que essa substituição não irá afetar significativamente os impactos ambientais. Sendo assim, Ghanbari, Abbasi e Ravanshadnia (2018) concluíram que um teor ótimo de substituição seria de 50% de agregados naturais pelos reciclados, a fim de se obter a redução das emissões de gases de efeito estufa e gerar economia no consumo de energia.

Wagih et al. (2013) concluíram que o material obtido através da reciclagem da cerâmica de argila vermelha (blocos, tijolos, telhas) pode ser utilizado para substituir o cimento, pois de acordo com Böke et al. (2006), ele possui altos teores de sílica e alumina na sua microestrutura que reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, decorrente da hidratação do cimento e da cal, formando silicatos e aluminatos de cálcio, por isso, ele aumenta a atividade pozolânica, conforme vai reduzindo o tamanho do material particulado. Essa substituição é necessária, pois a indústria do cimento apresenta um elevado potencial poluidor, pois em todo processo produtivo existem fontes de impactos ambientais e sociais, conforme apresenta a Figura 3.3 (ZONG; FEI; ZHANG, 2014; TEKLAY; YIN; ROSENDAHL, 2016; HUANG et al., 2021; THWE; KHATIWADA; GASPARATOS, 2021).

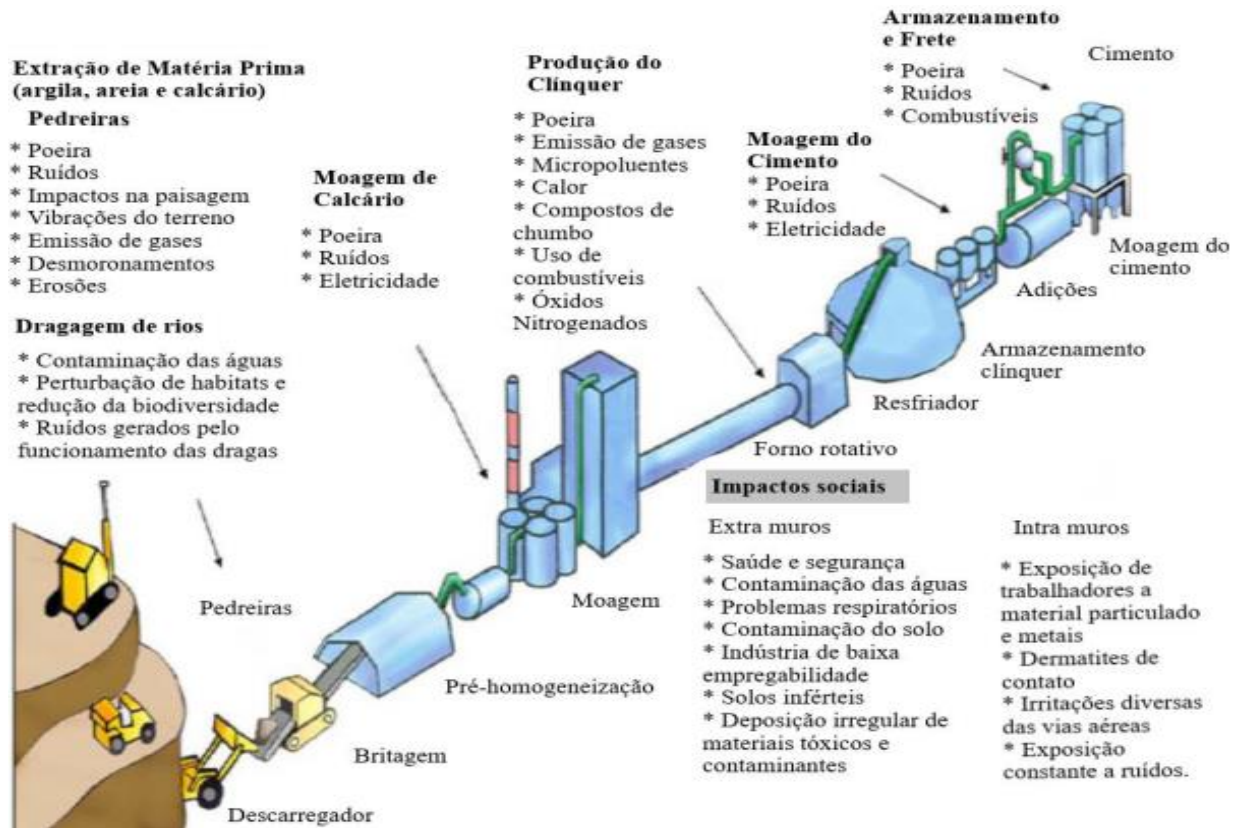


Figura 3.3 – Principais impactos ambientais e sociais ocasionados durante a produção do cimento

Fonte: Adaptado de Carvalho, 2008

Além disso, Schneider (2019) e He et al. (2020) afirmam que a indústria do cimento consome de 12 à 15% de toda energia global, e emite 0,8 toneladas de CO₂ por toneladas produzida, o que acaba contribuindo de 6 à 7% nas emissões antrópicas globais de CO₂, o que corresponde a 5% das emissões de gases de efeito estufa, sendo o Brasil circunscrito por 2,3% dessas emissões. Benhelal, Shamsaei e Rashid (2021) declaram que se essa indústria fosse um país, seria o terceiro maior emissor de gases de efeito estufa do mundo, atrás apenas da China e dos Estados Unidos.

Apesar desses altos índices, a indústria brasileira de cimento é reconhecida internacionalmente pelo excelente desempenho energético e ambiental. Além, de serem responsável por uma das menores taxas de emissões de gases do efeito estufa, quando comparadas a outros países, pois enquanto a média mundial é de 634 kg de CO₂ equivalente por tonelada de cimento, no Brasil esse valor é de 564 kg de CO₂ eq., o que representa 11% a menos. Ademais, o consumo térmico diminuiu 17%, o uso de combustíveis alternativos aumentou de 5% para 19% e o substitutos de clínquer passou de 20% para 33%. Entretanto, a indústria de cimento continua

buscando alternativas para tentar reduzir as emissões de gases do efeito estufa e assim poder contribuir no combate às mudanças climáticas. A eficiência ambiental dessas alternativas, muitas vezes são mensuradas através da avaliação do ciclo de vida (UN ENVIRONMENT, KAREN L. SCRIVENERA, VANDERLEY M. JOHNB, 2018; COSTA; RIBEIRO, 2020).

3.3. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é a compilação e ponderação das entradas e saídas, e dos potenciais impactos ambientais de um produto através do seu ciclo de vida. A mesma, constitui uma ferramenta estruturada, abrangente e padronizada em nível internacional que tem como objetivos: quantificar informações sobre as emissões e os recursos consumidos, os impactos ambientais, os impactos sobre a saúde humana e o nível de depleção de recursos (ISO 14040:2014; CHEN et al., 2019; CONG et al., 2020).

Segundo Vieira, Calmon e Coelho (2016) os primeiros estudos sobre ACV ocorreram entre os anos de 1960 e 1980, quando as grandes indústrias 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, que foi desencadeada devido ao déficit de oferta. Porém, o grande marco da utilização dessa metodologia ocorreu em 1969, quando a companhia de refrigerantes Coca Cola contratou o *Midwest Research Institut* (MRI) nos Estados Unidos, para estabelecer os índices de emissões de gases tóxicos gerados pelas garrafas de vidro retornáveis e as plásticas descartáveis. Este estudo ficou conhecido como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA).

Entretanto, em 1974 a mando da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), houve um aprimoramento do modelo REPA servindo de base para o estabelecimento de um procedimento de comparações dos impactos ambientais. Posteriormente, diferentes métodos foram aplicados para executar as ACV, porém, os resultados nem sempre eram coincidentes, o que prejudicou a confiança desta ferramenta e acarretou na necessidade de organizar essa metodologia. Por isso, no início da década de 1990, foi criado o primeiro guia sobre os aspectos metodológicos de uma avaliação do ciclo de vida, e em 1993 foi elaborado um código de práticas

para a sua realização, pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC*, o que resultou na publicação das séries de normas, conforme mostrado no Quadro 3.2 (FERRUFINO, 2012; CUNHA, 2016).

Quadro 3.2 – Normas referentes à avaliação do ciclo de vida - ACV

ISO 14.040: 1997	<i>Environmental management – Life Cycle Assessmente – Principles and Framework</i>
ISO 14.041: 1998	<i>Environmental management – Life Cycle Assessmente – Goal and scope definition and inventory analysis</i>
ISO 14.042: 2000	<i>Environmental management – Life Cycle Assessmente – Life cycle impact Assessmente</i>
ISO 14.043: 2000	<i>Environmental management – Life Cycle Assessmente – Life cycle Interpretation</i>
ISO 14.044: 2006	<i>Environmental management – Life Cycle Assessmente – Requirements and guidelines</i>
ISO/TR 14.049: 2000	<i>Environmental management – Life Cycle Assessmente – Examples of application of ISO 14.041 to goal and scope definition and inventory analysis</i>
ISO/TR 14.047: 2003	<i>Environmental management – Life Cycle Assessmente – Examples of application of ISO 14.042</i>

Fonte: Adaptado de Cunha, 2016

Nos anos seguintes, a ISO publicou uma nova edição das normas 14.040: 2014, 14.044: 2014, 14.049: 2014, 14.047: 2016 e 14.071: 2018 de avaliação de ciclo de vida, cujo objetivo era melhorar a legibilidade e remover erros e outras inconsistências. A SETAC continua formando parcerias e criando iniciativas para colocar em prática o conceito de ciclo de vida e assim poder melhorar as ferramentas de apoios, através da obtenção de dados de impactos ambientais mais recentes.

No Brasil, a ACV teve início em 1994, quando um subcomitê específico para o tema foi implantado dentro do Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA), tal grupo se dedicou à análise do desenvolvimento da série de normas ISO 14.000, o que foi possível em 2001 lançar a versão traduzida da norma internacional, e em novembro de 2002 foi criada a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), composta por pessoas físicas e jurídicas, interessadas no desenvolvimento e aplicação da ACV no país, que é liderado pelo Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental da Associação Brasileira de Normas Técnicas (SEO; KULAY, 2006; FERRUFINO, 2012; CUNHA, 2016).

3.3.1. Estrutura de uma Avaliação do Ciclo de Vida - ACV

De acordo com Ferrufino (2012) e Cunha (2016), a avaliação do ciclo de vida é uma metodologia de ponderação de implicações ambientais associados a um produto ou processo, compreendendo etapas que vão desde a extração das matérias-primas elementares da natureza que entram no sistema produtivo (berço) à disposição final do produto (túmulo).

Nessa óptica, a avaliação começa com a aquisição de matérias-primas e termina no momento em que todos os materiais sofrem disposição final, e o seu desenvolvimento está estruturado em quatro fases, conforme apresenta a Figura 3.4 (VIEIRA et al., 2018; FATHOLLAHI; COUPE, 2021).

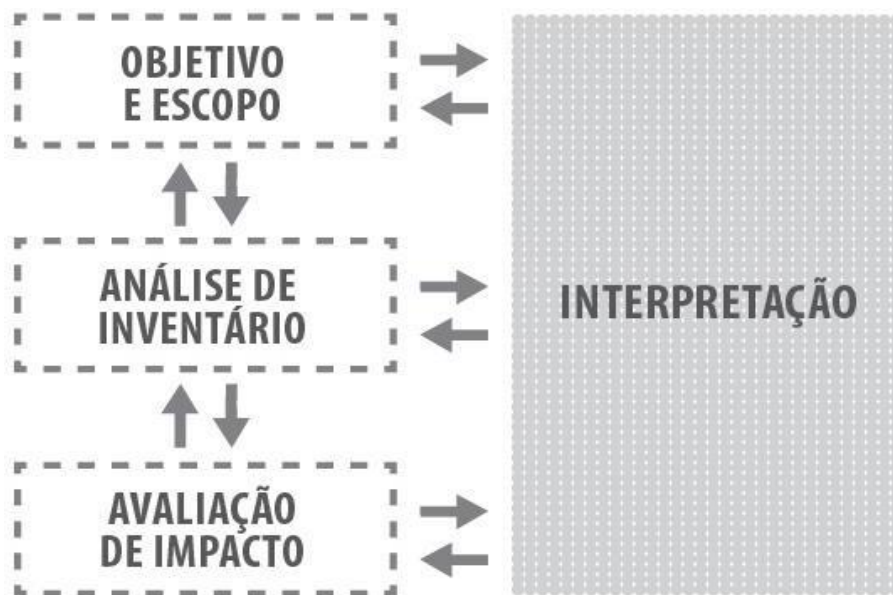


Figura 3.4 – Fases da avaliação do ciclo de vida

Fonte: NBR 14.040 (ABNT, 2014)

A primeira fase da avaliação do ciclo de vida é a determinação do objetivo e escopo. Nela deve-se estabelecer o objetivo, de forma clara e consistente para que a aplicação da metodologia seja viável; por isso, deve-se indicar as razões para a realização do estudo e o público-alvo a quem se destina, pois a ACV tem como finalidade garantir informações que possam ajudar na tomada de decisões sobre a sustentabilidade de um produto (DONG et al., 2015; VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

O escopo, por sua vez, define o que está incluído no sistema e quais serão os métodos de avaliação empregados, e de acordo com a norma ISO 14.044 (ABNT, 2014), nele devem ser considerados e descritos alguns aspectos. O primeiro deles consiste na definição das funções do sistema de produto, unidade funcional (medida que permite a quantificação da função definida) e o fluxo de referência (referência em relação a qual os dados de entrada e saída serão normalizados), além de constar o sistema de produto e suas fronteiras. Sendo assim, o escopo deve ser bem definido, pois ele irá assegurar a extensão, profundidade e o grau de detalhamento necessário ao estudo (LI; ZHU; ZHANG, 2010; INGRAO et al., 2014; VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

Todavia, Filho, Junior e Luedemann (2016) afirmam que o item mais importante do escopo é o procedimento de alocação, pois através dele serão observados os fluxos de materiais, de energia e de liberações ao ambiente associado, conforme apresenta o fluxograma da Figura 3.5.

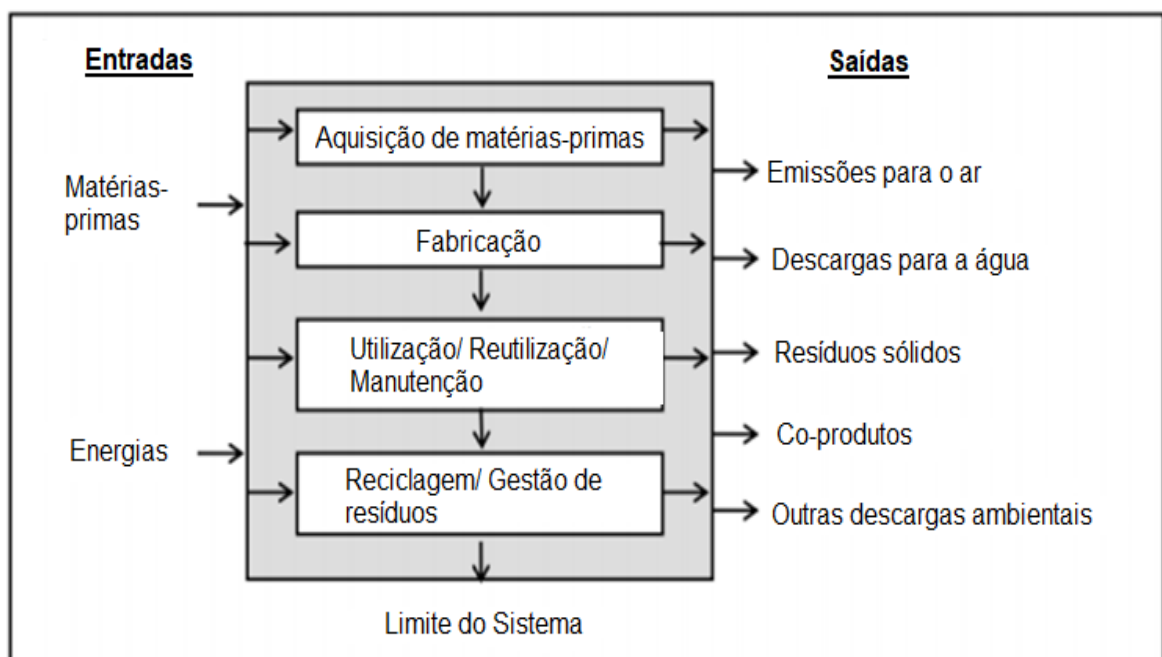


Figura 3.5 – Representação do ciclo de vida de um produto

Fonte: NBR 14.044 (ABNT, 2014)

A segunda fase da ACV é a análise de inventário de ciclo de vida (ICV), e de acordo com a NBR 14.040 (ABNT, 2014), é nele que são realizados os levantamentos, a compilação e a quantificação das entradas e saídas de um dado sistema em termos

de matéria-prima, energia, transporte, emissões para atmosfera, efluentes, resíduos sólidos, entre outros. Porém, Moreau et al. (2012) e Tonon (2019) afirmam que muitas vezes o ciclo de vida do produto é composto por milhares de processos unitários e a coleta desses dados necessitaria de muito tempo e recursos, tornando alguns estudos impraticáveis. Por isso, Dong et al. (2015) sugerem a utilização de banco de dados (Quadro 3.3), que armazenam informações de inventário de diferentes processos de produção, que estão inseridos em *softwares* que foram desenvolvidos para facilitar a sua realização.

Quadro 3.3 – Principais bancos de dados para ser empregados na realização da avaliação do ciclo de vida

Estados Unidos: USLCI <i>Database</i> , que foi desenvolvida pelo <i>National Renewable Energy Laboratory</i> (NREL) e o <i>Athena Sustainable Materials Institute</i> , ela é aberta ao público e contém dados de materiais e processos. Os inventários disponibilizados atendem à ISO/TS 14.048, sendo compatível com diversos formatos de softwares;
Holanda: IVAM LCA Data 4.0, desenvolvido pela agência de pesquisa IVAM em parceria com Departamento de Ciências Ambientais da Universidade de Amsterdã, ela é uma compilação de bases de dados conhecidas de materiais e processos, tais como: APME, BUWAL e ETH 96;
União Europeia: <i>European reference Life Cycle Database</i> (ELCD), que é uma base de dados fornecida e aprovada por associações empresariais da União Europeia e possui acesso livre;
Suécia: SPINE@CPM, que foi desenvolvido pelo <i>Competence Centre for Environmental Assessment of Product and Material System - CPM</i> na <i>Chalmers University of Technology</i> e contém informações detalhadas de atividades de transportes, geração de energia, produção de materiais e gerenciamento de resíduos sólidos, e possui acesso livre;
Alemanha: GaBi, é um banco de dados padrão elaborado para ser utilizado no software GaBi, cujos dados fornecidos são de pequenas, médias e grandes empresas do país.
Suíça: Ecoinvent, que foi elaborado por um consórcio entre o governo e empresas, ela é considerada a base de dados mais extensa e importante, para sua utilização, é necessário ter a licença para acesso, que está disponível nos softwares: Umberto NXT LCA, IKE, GaBi, SimaPro, Team e Quantis Suíça.

Fonte: Adaptado de Rocamora, Guzmán e Marrero, 2016

Takano et al. (2014), Rocamora, Guzmán e Marrero (2016) realizaram um estudo comparativo entre os principais bancos de dados, e verificaram que o *Ecoinvent* e o GaBi, possuem as maiores informações sobre o setor da construção civil, conforme apresenta a Figura 3.6.

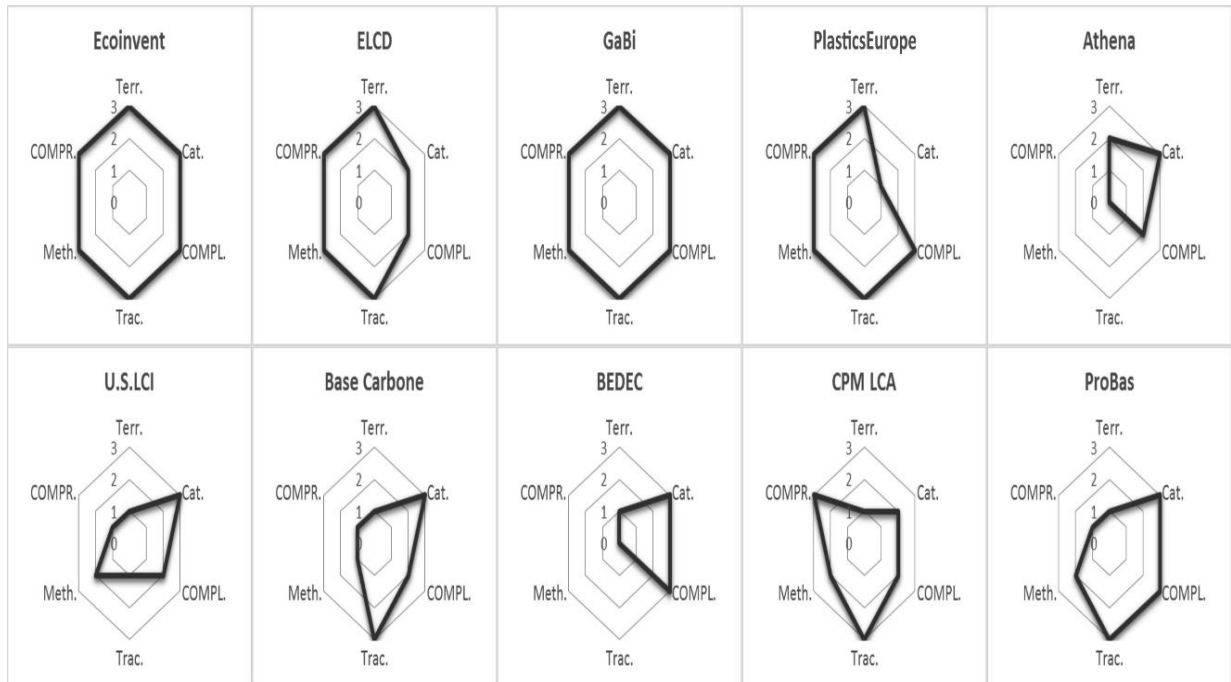


Figura 3.6 – Comparação entre os bancos de dados utilizados nas avaliações do ciclo de vida

Fonte: Rocamora, Guzmán e Marrero, 2016

Entretanto, por possuírem informações globais, muitas vezes elas diferem com a realidade do país onde a ACV está sendo realizada, podendo levar a problemas como contagem dupla e interpretações errôneas, o que acarreta erros de análise. Por isso, Dong et al. (2015) comentam que alguns estudos vem sendo realizados sobre as necessidades de nacionalizar o maior número de elementos a serem utilizados na ACV.

Na Nova Zelândia, Nebel, Alcorn e Wittstock (2009) formularam uma ACV para materiais de construção, integrando dados locais ao banco de dados do GaBi. Da mesma forma, a autoridade de habitação de Hong Kong estabeleceu um inventário de materiais de construção com base em bancos de dados no exterior, como IVAM, BUWAL e ETH-SEU (HONG et al., 2015). Enquanto isso, Tiemi, Colodel e IBP (2008) apresentaram uma abordagem para transferir os dados de ACV entre países, fornecendo um conjunto de fatores de conversão, tais como: o inventário a ser adaptado deve ser exteriorizado em termos de processos unitários, ou seja, não apenas em termos de resultados finais do sistema de produto, que devem ser similares, por isso, devem apresentar as mesmas propriedades e qualidade em ambos os países. Enquanto isso, Chau et al. (2007) desenvolveram um fluxograma de processo para ajudar a identificar os possíveis ajustes para os ACV de materiais de

construção. Porém, Dong et al. (2015) afirmam que as variáveis modificáveis são predominantemente a eletricidade, o combustível e o transporte, bem como as interações entre os mesmo. Enquanto isso, no Brasil Castro et al. (2015) realizaram uma análise da viabilidade técnica da adaptação dos dados para o contexto nacional, através de um estudo de caso sobre o emprego do concreto para paredes moldadas no local. Porém, os autores concluíram que essas pequenas adaptações não foram suficientes para obtenção de um resultado mais próximo da realidade nacional. Sendo assim, Dong et al. (2015) acreditam que pequenas alterações podem induzir a incertezas nas estimativas, por isso as variáveis devem ser ajustadas, conforme a disponibilidade dos fornecedores e descritas no inventário (ABOUHAMAD; ABU-HAMD, 2019).

A terceira fase é avaliação dos impactos ambientais, e segundo a NBR ISO 14.040 (ABNT, 2014) ela tem como objetivo compreender e avaliar a intensidade e o significado das alterações sobre o meio ambiente, o consumo de recursos naturais, energia e as emissões de substâncias relativas ao ciclo de vida do produto. Por isso, é considerada a parte mais crítica e importante de uma ACV, pois as normas da série NBR ISO 14.040 (ABNT, 2014) não estabelecem um critério de avaliação fixo, o que leva a discrepâncias de um estudo para outro (CUNHA, 2016; VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016; TONON, 2019; CONG et al. 2020).

E a última etapa de uma ACV é a interpretação dos resultados, cujos valores da avaliação serão analisados a fim de tirar conclusões, explicar limitações e fornecer recomendações para os tomadores de decisões de forma consistente. Sendo assim, a interpretação pode ser considerado um processo dinâmico e interativo, que permite rever e revisar as definições iniciais, assim como a qualidade e a natureza dos dados levantados (CUNHA, 2016; VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016; COLANGELO et al., 2018).

Além dessas etapas, pode-se realizar uma avaliação do custo do ciclo de vida, que de acordo com a norma ISO 15.686-5 (2017), é uma metodologia para avaliação econômica sistemática de custos do ciclo de vida de um período de análise, conforme definido no escopo da avaliação do ciclo de vida e tem como objetivo determinar a opção mais econômica entre as diferentes alternativas. Em palavras simples, os custos do ciclo de vida referem-se ao custo de um ativo ao longo de seu ciclo de vida,

e é composto por quatro categorias: a primeira delas é custo inicial que refere-se ao custo da matéria-prima e transporte, na segunda o custo operacional, terceira o custo de manutenção/reparo e por fim o custo de descarte (ABOUHAMAD; ABU-HAMD, 2019).

3.3.2. Avaliação do Ciclo de Vida e os Resíduos de Construção Civil

De acordo com Jiang et al. (2015), Cunha (2016) e Song et al. (2021), toda atividade humana independentemente de suas características, acarreta em impactos ao meio ambiente, pois mesmo na era paleolítica quando os homens sobreviviam da prática da caça, da pesca e da coleta dos vegetais, o impacto ambiental já estava presente. Os autores, afirmam que com o surgimento das civilizações, o homem passou a extrair do meio ambiente mais do que o imprescindível para sua subsistência, pois eles acreditavam que os bens naturais foram criados para livre disposição, e por isso, são renováveis o que acarretou no desequilíbrio do ecossistema e do meio ambiente. Consequentemente, em alguns locais do mundo já surgem as implicações como falta de água, poluição urbana, aquecimento global e esgotamento de outros recursos naturais.

Com isso é possível perceber a extrema importância da realização de estudos que visem melhorar a qualidade de vida e a minimização dos danos causados pelo ser humano. Na construção civil Alencar, Priori e Alencar (2017) relatam que esses estudos estão voltados na criação de novos produtos (KOWALKOWSKI; GEBAUER; OLIVA, 2017; SECHER; COLLIN; LINNET, 2018; TSENG et al., 2019; LI et al., 2021), na reutilização de recursos naturais (MILNER, 2009; SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011; LUSHNIKOVA; DVORKIN, 2016), na racionalização do uso de energia (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; GOLIĆ; KOSORIĆ; FURUNDŽIĆ, 2011; HUGHES; CHAUDHRY; GHANI, 2011; PACHECO; ORDÓÑEZ; MARTÍNEZ, 2012), na utilização de sistemas para reduzir o consumo de água (FRIEDLER; HADARI, 2006; ALBALAWNEH; CHANG, 2015; GISI et al., 2015; BODDU et al., 2016; HASIK et al., 2016; YOONUS; AL-GHAMDI, 2020) e na reciclagem de materiais (ABUKERSH; FAIRFIELD, 2011; ALIABDO; ABD ELMOATY; AUDA, 2014; PRADHAN et al., 2019; TAJI et al., 2019; JAIN; GUPTA; CHAUDHARY, 2020; GAUTAM et al., 2021).

E para esses estudos diversas metodologias vêm sendo empregadas, dentre elas a avaliação do ciclo de vida (ACV), pois é uma ferramenta que tem como objetivo identificar melhorias dos aspectos ambientais, considerando as várias fases de um sistema de produção, contribuindo para a diminuição dos impactos (RASHID; YUSOFF, 2015; CHRISTENSEN et al., 2020; DING et al., 2021).

Ramesh, Prakash e Shukla (2010) reiteram que através da elaboração de uma avaliação do ciclo de vida, foi possível analisar o desempenho ambiental de setenta e três edificações comerciais e residenciais em treze países, e conclui-se que 80 a 90% dos impactos ambientais são gerados na fase de operação. Resultados similares foram observados na pesquisa desenvolvida por Rossi et al. (2012), cujos autores afirmam que essa etapa é responsável por 62 a 98% do impacto do ciclo de vida, enquanto a fase de construção corresponde entre 1 a 20% e a fase de demolição por 0,2 a 5% dos impactos ambientais. Isso ocorre, devido ao seu longo tempo de uso e manutenção, já que suas emissões estão relacionadas à queima de combustíveis fósseis para geração elétrica e aquecimento de ambientes. Sendo assim, Kofoworola e Gheewala (2009) identificaram que a fase de uso de um prédio de escritórios de 60.000m² na Tailândia, com vida útil de 50 anos foi responsável por 81% do consumo total de energia. Mithraratne, Vale, (2004) e Chandrakumar et al. (2020) conduziram uma comparação de três tipos de construções residenciais na Nova Zelândia, e sua fase de uso contribuíram com 74%, 71% e 57%, para um ciclo de vida de vida de 100 anos.

Blengini, Di Carlo (2010), Rossi et al. (2012), Abdmouleh, Alammari e Gastli (2015) afirmam que muitos autores negligenciam os dados da etapa de construção na ACV, por possuírem um valor percentual pequeno. Entretanto, eles afirmam que os resíduos gerados durante o processo, quando mal gerenciado eles maximizam os impactos socioambientais. Além disso, Akhtar e Sarmah (2018) comentam que esses resíduos muitas vezes são desnecessários, e surgem devido à suprimentos excessivamente solicitados ou ao manuseio incorreto de materiais por trabalhadores não qualificados, diferentemente dos resíduos provenientes da demolição, já que ela é essencial para o desenvolvimento de megacidades onde a falta de espaço é o maior obstáculo.

Faleschini et al. (2016) realizaram na Itália uma avaliação do ciclo de vida para quantificar os impactos ambientais para obtenção dos agregados naturais e reciclados de RCC, e concluíram que os agregados naturais geram mais externalidades, devido as emissões atmosféricas, remoção da camada vegetal e as detonações de rocha. Enquanto isso, Hossain et al. (2016) afirmam que o beneficiamento dos resíduos de construção, reduz cerca de 65% das emissões de gases de efeito estufa e economizam 58% no consumo de energia renovável. Sendo assim, Poon, Kou e Lam (2002) realizaram um estudo para avaliar a viabilidade da utilização dos RCC, na fabricação de blocos de concreto, e concluíram que a substituição do agregado natural graúdo e miúdo por agregado reciclado em níveis de 25% e 50% teve pouco efeito na resistência do bloco, mas níveis mais elevados de substituição reduziram a resistência à compressão.

Todavia, Tonon (2019) afirma que uma das mais relevantes pesquisas desenvolvidas sobre a utilização de resíduos de construção e demolição, a fim de obter-se agregado reciclado foi realizada por Marinković et al. em 2010, onde os autores compararam o impacto ambiental da produção do concreto usinado com agregado natural e com agregado reciclado, para isso, eles empregaram como unidade funcional 1m³ de agregados, e o traço dos concretos foi determinado para que ambos os tipos tivessem a mesma resistência à compressão e a mesma trabalhabilidade. Posto isto, os autores concluíram que a produção de cimento foi a que mais contribuiu em todas as categorias de impacto, seguida pelo transporte dos insumos empregados na confecção do concreto. Diferentemente do ocorrido na ACV desenvolvida por Estanqueiro et al. (2016), cujo os autores verificaram que o uso de agregado reciclado na produção de concretos foi favorável apenas nas categorias de uso da terra e inorgânicos inaláveis.

Conseqüentemente, Knoeri et al. (2013), Tošić et al. (2015), Kurda, Silvestre e De Brito (2018) afirmam que os impactos ambientais dos agregados reciclados e naturais, serão afetados significativamente caso seja necessário elevar o consumo de cimento para obter um concreto com agregado reciclado com propriedades de resistência, trabalhabilidade e durabilidade semelhantes ao concreto com agregado natural. Deste modo, Weil et al. (2006) compararam o concreto com uma comutação de 35% e 50% do agregado natural pelo reciclado e concluíram que para o mesmo teor de cimento, o uso de energia e o potencial de aquecimento global serão

semelhantes. Enquanto isso, Paula (2016) realizou a substituição de cimento Portland por resíduos de cerâmica vermelha, e demonstrou que é possível produzir uma argamassa com melhor desempenho mecânico, ambiental e maior durabilidade. Porém, Yazdanbakhsh et al. (2018) compararam um concreto com agregado natural e com agregado reciclado, e perceberam que os impactos ambientais foram similares. Contudo os autores afirmam que quando o aterro evitado foi contabilizado, a magnitude de alguns dos indicadores de impacto ambiental do concreto com agregado reciclado tornou-se menor do que a do concreto com agregado natural (16% e 17% para acidificação e formação de fumaça).

Tam, Soomro e Evangelista (2018) afirmam que na Austrália, Estados Unidos, China e Europa os agregados reciclados na maioria das vezes são empregados como insumo em bases e sub-bases de pavimentos asfálticos, pois eles possuem alta resistência, estabilidade adequada e módulo de resiliência superior ao da brita graduada. No Brasil, a primeira utilização do agregado reciclado para pavimentação ocorreu em 1984 na cidade de São Paulo, o que acarretou na redução dos impactos socioambientais, já que ele minimizou o consumo de recursos naturais não renováveis e deu uma destinação alternativa em relação aos aterros licenciados tradicionais. Através desse experimento, foi elaborada em 2004 a NBR 15.115 (ABNT, 2019) a primeira normatização que versava sobre os procedimentos para o emprego de agregado reciclado em pavimentação asfáltica, e a NBR 15.116 (ABNT, 2021) que estabelecia os requisitos na utilização dos agregados em camadas de pavimentação e para a preparação de concretos sem função estrutural.

Souza e Lukiantchuki (2019) afirmam que em São Francisco, nos Estados Unidos, é permitido o uso de agregados reciclados em obras não estruturais, pois de acordo com Tam, Tam (2006), Xiao et al. (2012), Abd Elhakam, Mohamed, Awad (2012), Özalp et al., (2016) e Ahmad et al. (2021) os resíduos de construção civil afetam nas propriedades dos concretos, devido à argamassa aderida em torno do RCC, o que impede uma ligação adequada entre o substrato e o agregado reciclado. Entretanto, na Europa de 6 a 8% dos agregados reciclados são empregados na produção dos concretos, e na Austrália são utilizados anualmente 0,5 milhões de toneladas de agregados reciclados para confecção de concreto.

No entanto, os RCC também podem ser produzidos após um desastre natural, tais como: tsunamis, terremotos, furacões, inundações, deslizamentos de terra e erupções vulcânicas. Por isso, Tabata et al. (2019) afirmam que as cidades devem possuir uma gestão de resíduos para fenômenos naturais, uma vez que eles acarretam em grandes quantidades inesperadas de entulho, entre 5 e 15 vezes a produção anual de resíduos de uma comunidade. Sendo assim, a gestão de resíduos tem como objetivo, dar um tratamento adequado aos entulhos recolhidos com um impacto ambiental mínimo e a custos acessíveis. E, para isso, diversas pesquisas de custo (BARROS, 2005; BENTO et al., 2013; SILVA, 2014; BONDRANI, 2015; WASKOW, 2019; LI et al., 2019; BARRETO et al., 2021; ZHANG et al., 2022;) e ciclo de vida vem sendo desenvolvidas.

Tanon (2019), Yilmaz e Seyis (2021) afirmam que 66,3% das pesquisas sobre a ACV e os resíduos de construção civil foram elaborados nos países europeus, 17,5% nos Estados Unidos, 10% na Ásia, 3,8% na Oceania e 2,5% na África. Acredita-se que isso ocorra, pois os países europeus estabeleceram uma meta que até o ano de 2020 deveriam ser reciclados ou reutilizados 70% dos resíduos de construção civil, pois a partir de 2025 será proibido a disposição de RCC em aterros de resíduos recicláveis, devido ao seu potencial de reciclagem. Na Nova Zelândia e Austrália, ficou estabelecida uma taxa de 80% de reaproveitamento e, para isso, os países vêm impondo uma tarifa de aterro sanitário sobre o descarte de resíduos. Anteriormente, esse valor variava entre U\$S 31,00 a U\$S 76,00 porém em 2016, tal tarifa passou a ter um aumento de U\$S 10,00 ao ano com a revisão de incremento de custo (BOVEA; POWELL, 2016).

Enquanto isso, o Canadá possui uma geração de 9 milhões de resíduos de construção civil anual e taxa de recuperação de 7%. Yeheyis et al. (2013) acreditam que isso ocorra, pois seus RCC possuem elementos perigosos, tais como: amianto, mercúrio, tinta à base de chumbo, e a sua inalação pode causar problemas respiratórios e seu gerenciamento torna-se muito caro. Nos Estados Unidos são beneficiados 70% dos resíduos gerados, e a energia economizada com essa reciclagem é idêntica a 85 milhões de barris de petróleo, além de gerar um lucro de U\$ 7,4 bilhões para economia do país. Na Coreia do Sul os RCC contribuíram com mais de 2,1 bilhões de dólares (JIN; CHEN, 2015).

Sendo assim, Bovea e Powell (2016) afirmam que a reciclagem de resíduos não só ajudará na conservação de energia nos países, mas também irá melhorar a sua economia.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos, que foram empregados para a realização da análise de sensibilidade do transporte, custo e avaliação do ciclo de vida entre o concreto com agregado graúdo natural e com agregado reciclado, obtido através da reciclagem dos resíduos de construção civil (RCC).

4.1. Método de Pesquisa

De acordo com Silva e Menezes (2005) a pesquisa sob o ponto de vista da sua natureza pode ser classificada como aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimento para a aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais, tais como: minimizar os impactos ambientais ocasionados pela geração de resíduos de construção civil e a fabricação do concreto.

Já sob o ponto de vista da abordagem do problema esse trabalho é considerado como uma pesquisa quantitativa, pois considera que tudo pode ser quantificável, ou seja, traduz em números as informações, para posterior classificação e análise das mesmas, tais como: realizar uma análise de custo e uma avaliação do ciclo de vida entre o concreto com agregado graúdo natural e com agregado reciclado, obtido através do beneficiamento dos resíduos de construção civil (SILVA; MENEZES, 2005; CUNHA, 2016).

Quanto aos objetivos trata-se de uma pesquisa exploratória múltipla porque tem como propósito a formulação de uma problemática específica por meio de um estudo de caso, o qual exige: levantamento bibliográfico, discussão com envolvidos nos processos e análise de exemplos que estimulem a compreensão (MENEZES; SILVA, 2005).

Com relação aos procedimentos técnicos o trabalho caracteriza-se por ser um estudo de caso, que segundo Gil (1996) é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira a permitir o seu conhecimento amplo e detalhado, tarefa praticamente impossível mediante outros tipos de delineamentos considerados. Sendo assim, ele tem como objetivo explorar, descrever e explicar situações reais complexas em que os limites não são devidamente definidos.

4.2. Método de Trabalho

Na Figura 4.1 encontra-se um fluxograma, com as etapas que foram executadas a fim de que os objetivos propostos no presente trabalho fossem alcançados.

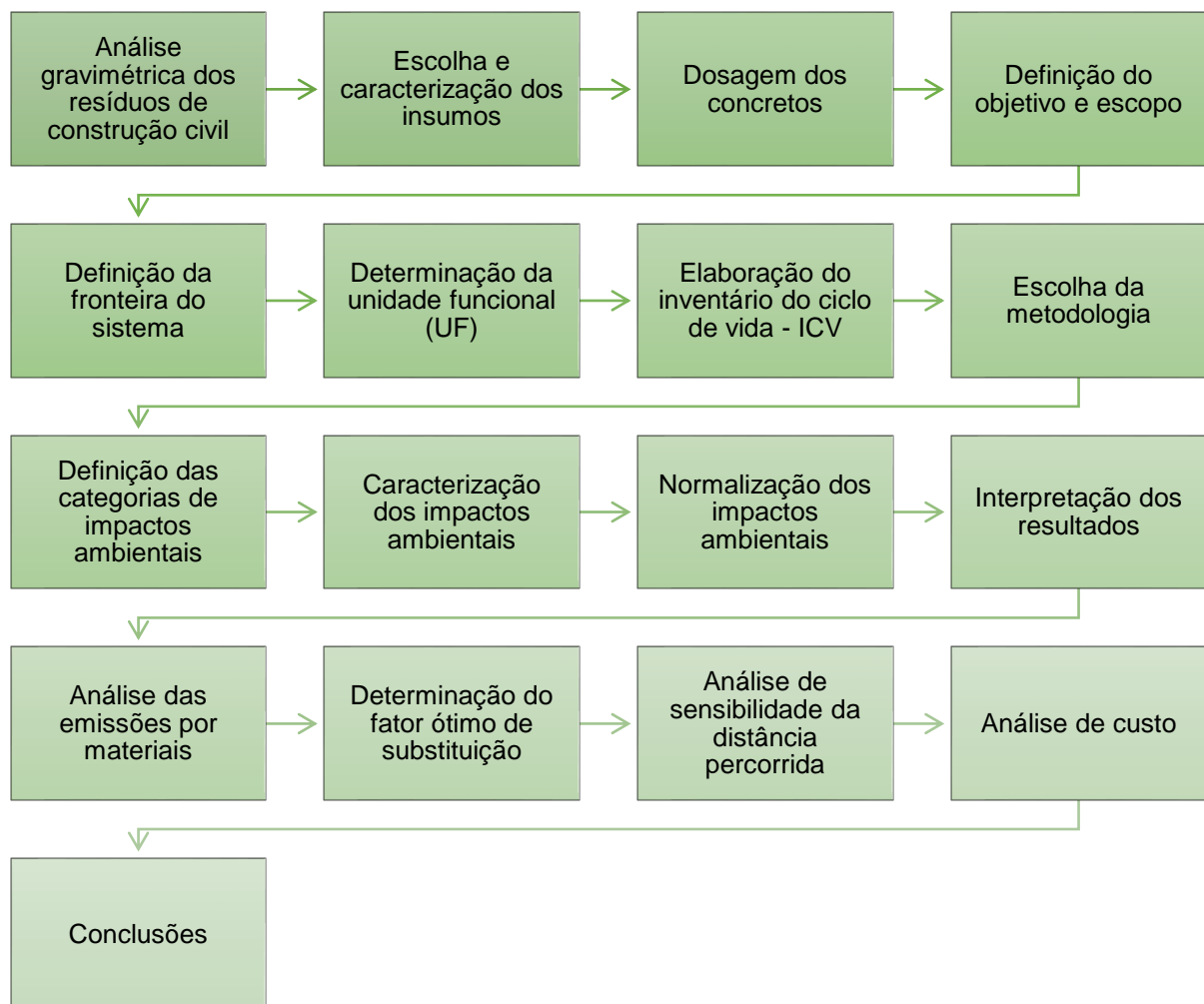


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa

4.2.1. Obtenção e Processamento dos Resíduos de Construção Civil – RCC

O agregado reciclado empregado para a substituição do agregado graúdo natural, foi obtido através da reciclagem dos resíduos de construção civil originários da reforma do prédio 15 da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), e para a sua utilização passaram por um estudo gravimétrico, onde foi empregada a técnica de coleta de amostras e análise visual macroscópica, visando determinar a composição do mesmo, uma vez que materiais indesejáveis podem reduzir o desempenho mecânico dos agregados reciclados.

Para tanto, foi necessário praticar a separação do material e segregá-los, a fim de realizar a pesagem para obter a sua composição, conforme apresentado na Figura 4.2. Toda a análise foi baseada na norma NBR 16.915 (ABNT, 2021), que estabelece os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua coleta e beneficiamento até o armazenamento e transporte das amostras representativas de agregados para concreto, destinadas a ensaios de laboratório e contraprova.

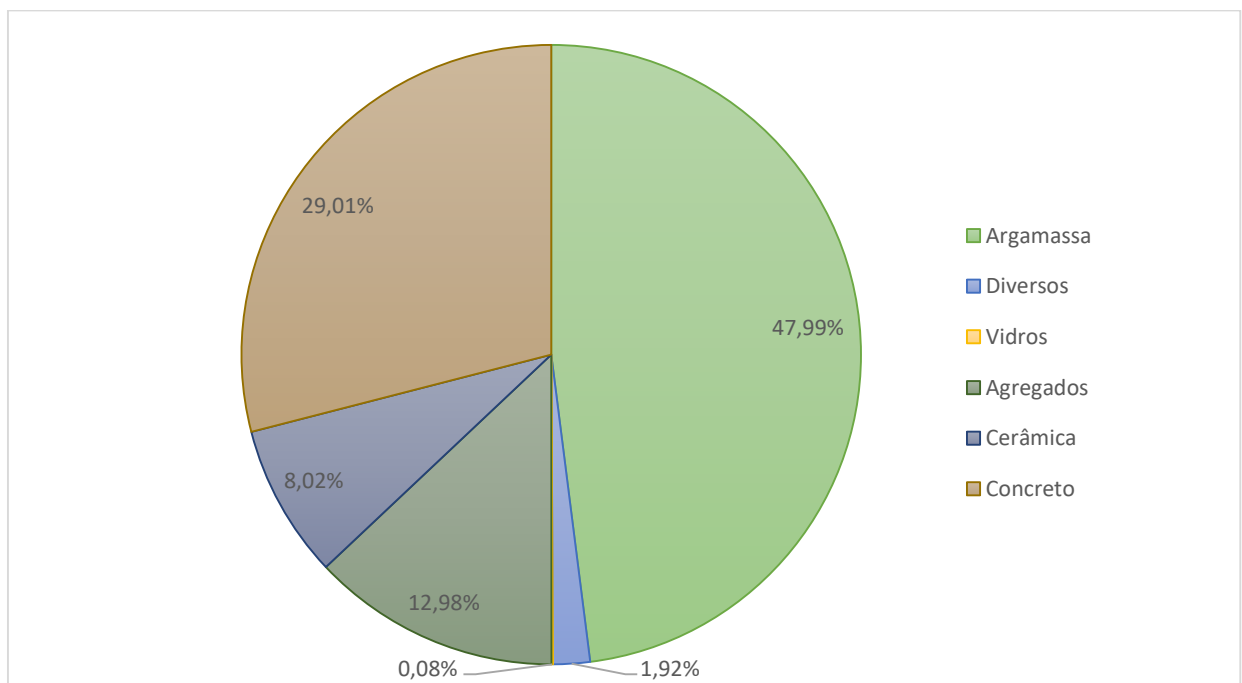


Figura 4.2 - Composição gravimétrica dos resíduos de construção civil

Fonte: Adaptado de Silva e Andrade, 2017

Sendo assim, na Figura 4.2 observa-se que a maior parte dos resíduos de construção civil empregado no presente trabalho é composto por concreto e argamassa, uma vez que corresponde a 77% dos materiais, cuja fração minoritária são de materiais diversos com índice de 1,92%, inferior ao estabelecido pela NBR 15.115 (ABNT, 2019) que é de 3% (SILVA; ANDRADE, 2017).

4.2.2. Caracterização dos Insumos Empregados na Produção do Concreto

Para a produção dos concretos empregou-se como aglomerante o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), com massa unitária de 1,02 g/cm³, densidade de 3,05 g/cm³ e resistência à compressão de 54,1 MPa aos 28 dias, cuja composição química foi medida através do ensaio de fluorescência de raio-X e apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Ensaio de fluorescência de raio-X do cimento Portland V-ARI

Elementos	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	LOI
%	4,86	19,45	64,44	0,62	0,7	2,94	0,20	0,78

Fonte: Adaptado de Silva e Andrade, 2017

Como agregado miúdo utilizou-se a areia siliciosa extraída das margens do Rio Jacuí localizado na cidade de Porto Alegre (RS), e como agregados graúdos foram empregados dois tipos diferentes de materiais: a brita basáltica oriunda da cidade de Montenegro (RS) e o agregado reciclado de Santo Antônio da Patrulha (RS). Foram realizados ensaios de caracterização dos mesmos, conforme apresentado na Tabela 4.2 e na Figura 4.3.

Tabela 4.2 - Caracterização física dos agregados

Ensaio	Areia	Ensaio	Agregado reciclado	Brita	Ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,61	NBR NM 52	2,90	2,57	NBR NM 53
Absorção de água (%)	1,20	NBR NM 30	0,83	4,54	
Densidade aparente (g/cm ³)	1,50	NBR NM 45	1,47	1,25	NBR NM 45
Módulo de finura (mm)	2,75	NBR NM 248	8,59	7,17	NBR NM 248
Dimensão máxima (mm)	2,38		19	19	

Fonte: Adaptado de Tonon (2019), Silva e Andrade (2017)

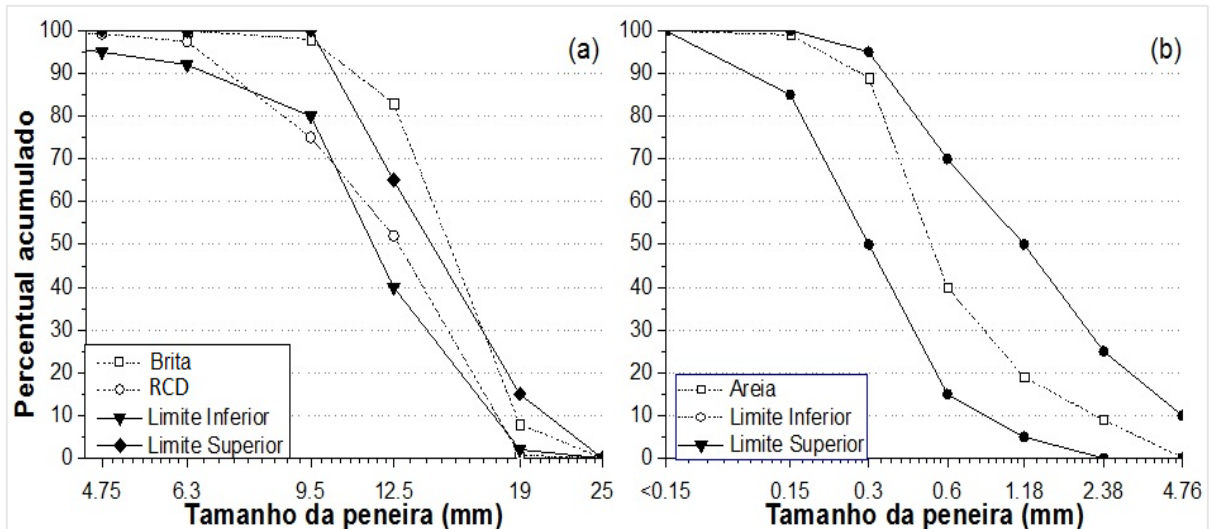


Figura 4.3 - Curva granulométrica dos agregados empregados no concreto

Fonte: Adaptado de Tonon (2019), Silva e Andrade (2017)

De acordo com Silva, Andrade (2017) e Bravo et al. (2018) os agregados naturais possuem massa específica elevada quando comparada aos agregados reciclados, porém esses possuem maior absorção de água, conforme apresentado na Tabela 4.2. Isso ocorre devido à argamassa aderida em torno do RCC, que não propiciam uma adequada aderência entre a nova pasta e o agregado reciclado, demandando uma maior quantidade de água nas misturas de forma a garantir a hidratação do cimento (DABHADE; CHAUDARI; GAJBHAYE, 2014; MEDINA et al., 2014; PACHECO et al., 2019).

4.2.3. Dosagem do Concreto

A fim de atender às exigências associadas com a NBR 6.118 (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 foram produzidos concretos com resistência à compressão aos 28 dias igual a 32 MPa, pois fica na faixa entre 30 a 40 MPa adotado por diversos pesquisadores, tais como: Zhang et al. (2019), Domagoj (2018), Marinković et al. (2017), Bovea, Powell (2016), Viera, Calmon, Coelho (2016), Paula (2016), Dong et al. (2015), Marinković, Malešev, Ignjatović (2013), Limbachiya, Meddah, Ouchagour (2012) e Marinković et al. (2010). Esses valores de resistência para concreto são muito utilizados em obras de engenharia devido à alta resistência ao meio agressivo quando

uma estrutura construída for exposta ao grande risco de deterioração (NBR 6.118, ABNT, 2014).

Segundo Silva e Andrade (2017), para a moldagem dos concretos empregou-se o método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), cujo teor de argamassa (α) foi mantido constante e igual a 55% para todas as misturas, e a trabalhabilidade foi fixada em 90 ± 10 mm com base no método de abatimento do tronco de cone. O procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova foi realizado de acordo com a NBR 5.738 (ABNT, 2015). Sendo assim, foram montadas as curvas de Abrams para cada um dos concretos (tanto os de referência quanto os com substituição pelo agregado reciclado) com os dados de ruptura dos corpos de prova aos 28 dias. De posse das curvas individuais fixou-se uma resistência de 32 MPa para todos os concretos – resistência essa que se enquadra dentro das exigências da NBR 6.118 (ABNT, 2014) no que concerne à relação a/c máxima – e os traços foram desdobrados considerando tal condição. Desta forma, foi estabelecida a composição do concreto de referência, conforme apresentado na Tabela 4.3.

O objetivo deste estudo foi realizar uma avaliação do ciclo de vida entre o concreto com agregado graúdo natural (CONREF00), que não apresenta nenhuma substituição, com o concreto composto por agregado reciclado em diferentes teores de substituição em massa (25%, 50%, 75% e 100%). Sendo assim, inicialmente os agregados reciclados foram empregados na condição saturada com superfície seca. Isso quer dizer que esses agregados reciclados foram saturados em água por 24 horas antes do início da produção do concreto a fim de evitar a absorção de água da mistura e garantir a hidratação do cimento. Por isso, Lovato et al. (2012), determinam que seja realizado a compensação de volume, através da Equação 4.1.

$$M_{AGREC} = M_{AGN} * \frac{\rho_{AGREC}}{\rho_{AGN}} \quad (4.1)$$

Onde: M_{AGREC} = massa do agregado reciclado (g); M_{AGN} = massa do agregado natural (g); ρ_{AGREC} = massa específica do agregado reciclado (g/cm^3) e ρ_{AGRN} = massa específica do agregado natural (g/cm^3).

Desta forma, foi possível determinar as composições para os concretos com as substituições de agregado graúdo natural pelos agregados reciclados, conforme mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Quantitativos de insumos para produzir 1m³ de concreto para f_c= 32 MPa

Concreto	Traço unitário	Insumos					a/c	
	(Cimento: Brita: Agregado reciclado)	Areia: Agregado	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Agregado reciclado (kg)		Água (kg)
CONREF00	1:3,28:3,80:0,00		283,02	929,04	1.074,85	0,00	180,61	0,64
CONARM25	1:2,39:2,25:0,75		346,84	827,87	781,29	260,43	182,89	0,53
CONARM50	1:1,66:1,18:1,18		427,59	710,72	504,72	504,72	187,12	0,44
CONARM75	1:1,06:0,46:1,37		534,55	567,69	244,36	733,09	194,23	0,36
CONARM100	1:0,96:0,00:1,74		547,26	526,25	0,00	951,98	192,05	0,35

Com base nesses traços (Tabela 4.3) foi desenvolvido o inventário do ciclo de vida a fim de realizar a avaliação do ciclo de vida (ACV) dos concretos, conforme será apresentado nos itens a seguir.

4.2.4. Definição do Objetivo, Escopo, Fronteira do Sistema e Unidade Funcional da Avaliação do Ciclo de Vida

O principal objetivo deste estudo foi realizar uma análise comparativa de desempenho ambiental entre o concreto com agregado graúdo natural e reciclado, obtidos através da reciclagem dos resíduos de construção civil (RCC), além de avaliar o custo de sua utilização.

Para realizar a ACV utilizou-se o software *SimaPro Faculty* versão 9.0.1.11 (2020), pois de acordo com Seto, Panesar e Churchill (2017) ele é a ferramenta mais utilizada, devido a sua flexibilidade e capacidade para promover a análise detalhada por meio de modelagem e armazenamento. Além disso, o mesmo segue as recomendações das normas ISO 14.040 e 14.044 (ABNT, 2014).

O banco de dado utilizado foi o *Ecoinvent v3.6* conforme já empregado por diversos pesquisadores (PRADHAN ET AL., 2019; TONON, 2019; ZHANG ET AL. 2019; DOMAGOJ, 2018; MARINKOVIĆ ET AL., 2017; BOVEA, POWELL, 2016;

VIERA, CALMON, COELHO, 2016; PAULA, 2016, ROCAMORA, 2016; DONG et al., 2015; INGRAO et al., 2014), pois o mesmo contém o maior volume de informações sobre materiais de construção civil. Enquanto isso, o método de cálculo utilizado para a caracterização e normalização dos impactos de ciclo de vida foi o CML 2002, pois de acordo com Ingrao et al. (2014) ele é o mais empregado para pesquisas na área de análise ambiental de concretos.

A unidade funcional (UF) adotada na pesquisa foi de 1 m³ de concreto com resistência de 32 MPa, cuja fronteira do sistema adotada foi de uma abordagem berço ao portão (*cradle-to-gate*), que considera o ciclo de vida do produto desde a extração de matéria-prima até a porta da “fábrica”. Sendo assim, a Figura 4.4 apresenta as fronteiras do sistema, onde foram considerados os processos de obtenção das matérias-primas (cimento, areia, brita e água), o processamento/produção, o beneficiamento dos resíduos de construção civil alocados.

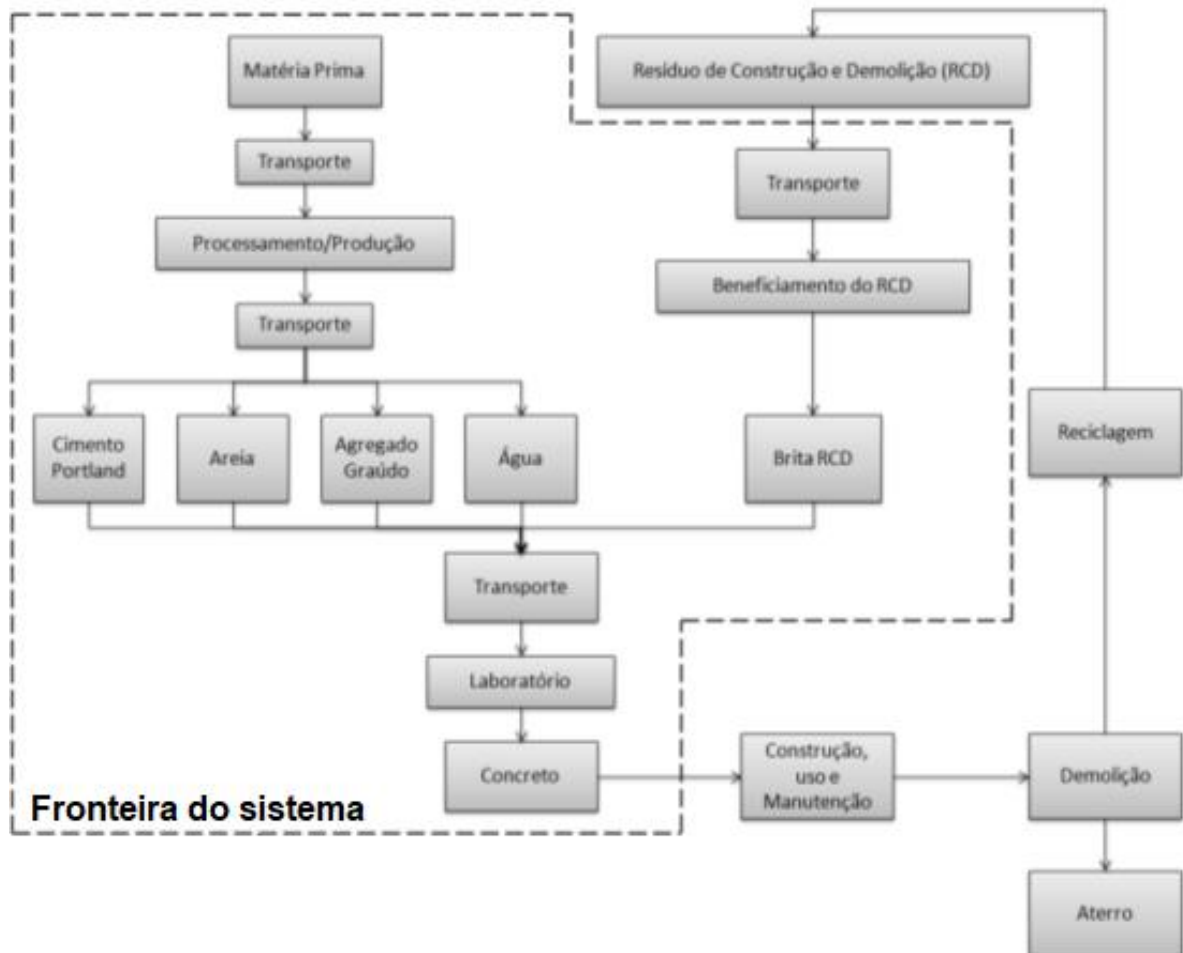


Figura 4.4 – Fronteira empregada na realização da avaliação do ciclo de vida

Já as categorias de impactos caracterizadas foram: depleção de recursos abióticos e combustíveis fósseis, oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização, aquecimento global, depleção da camada de ozônio estratosférico, toxicidade em águas doces, marinha, humana e terrestre, pois são todas que a metodologia escolhida abrange. Definiu-se como público-alvo deste estudo a comunidade acadêmica, os setores da indústria envolvidos direta ou indiretamente e o poder público.

4.2.4.1. Metodologia de Avaliação de Impacto Ambiental

A metodologia de avaliação de impactos do ciclo de vida adotada nesta pesquisa foi a CML 2002, desenvolvida pelo Centro de Ciências Ambientais (*Institute of Environmental Sciences*) da Universidade de Leiden na Holanda, pois de acordo Paula (2016) essa é uma metodologia com abordagem *midpoint* (orientada a problemas) da qual o SimaPro dispõe de duas versões: a estendida com categorias de impacto extras e a *baseline*, com 10 categorias de impacto (Quadro 4.1) que foi aplicada para o desenvolvimento dessa ACV.

Quadro 4.1 – Impactos ambientais da metodologia CML-2002

Impactos Ambientais	Definição	Siglas	Unidade	Aplicação
Depleção de recursos abióticos e combustíveis fósseis	Diz respeito a redução de recursos naturais devido à extração de combustíveis fósseis.	ADP; ADP-ff	MJ/kg	Global
Aquecimento global	Diz respeito às emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera.	GWP	CO ₂ equivalente/kg	Global
Depleção do ozônio estratosférico	Diz respeito ao aumento da quantidade de raios ultravioletas.	ODP	CFC-11 equivalente/kg	Global
Toxicidade em águas doces	Diz respeito as emissões de substâncias tóxicas para água, solo e ar que geram impacto ao ecossistema de água doce.	FAETP	1,4 - diclorobenzeno equivalente/kg	Global

Quadro 4.2 – Impactos ambientais da metodologia CML-2002

Quadro 4.1 – Impactos ambientais da metodologia CML-2002 (Continuação)

Impactos Ambientais	Definição	Siglas	Unidade	Aplicação
Toxicidade marinha	Diz respeito as emissões substâncias tóxicas encontradas nos ambientes marinhos.	MAETP	1,4 - diclorobenzeno equivalente/kg	Global
Oxidação fotoquímica	Diz respeito ao aumento da concentração de ozônio na camada mais baixa da atmosfera devido às reações foto-catalisadas em poluentes.	POCP	C ₂ H ₄ equivalente/kg	Regional
Acidificação	Diz respeito ao 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 ₂ equivalente/kg	Regional
Eutrofização	Diz respeito ao aumento da concentração de nutrientes no ambiente causando o aumento do número de espécies no ecossistema	EP	PO ₄ ³⁻ equivalente/kg.	Global
Toxicidade humana	Um problema ambiental causado por substâncias tóxicas ou pela poluição encontrada no ambiente humano.	HTP	1,4 - diclorobenzeno equivalente/kg	Regional

Fonte: Adaptado de Paula (2016) e Tonon (2019)

As categorias de impactos normalizadas foram: eutrofização, mudanças climáticas, depleção de recursos abióticos, depleção da camada de ozônio estratosférico, toxicidade em águas doces, marinha e terrestre, pois de acordo com o Quadro 4.1 elas possuem uma abrangência global.

4.2.4.2. Inventário do Ciclo de Vida – ICV

A definição do objetivo e escopo do trabalho provê as condições para o início da segunda fase de um estudo de ACV onde realiza-se a análise do inventário do ciclo de vida. Esta etapa envolve a coleta dos dados necessários para a pesquisa, compilados em um conjunto de entradas e saídas de um dado sistema (NBR 14.040, 2014).

De acordo com a NBR 14.044 (ABNT, 2014), a qualidade dos dados adotados deve contemplar a cobertura temporal, geográfica e tecnológica, a representatividade,

incerteza e reprodutibilidade do dado. E segundo a ISO 14.067 (ABNT, 2018), os dados coletados podem ser classificados como primários, que são quantificados através de medição direta ou com um cálculo baseado nessas medições, e os secundários que são os dados obtidos por outras fontes como banco de dados ou literatura publicada e validada por autoridades competentes.

Para a realização desta pesquisa serão empregados os dois tipos de dados, a fim de que seja possível avaliar o ciclo de vida do concreto com agregado graúdo natural (CONREF00) e com agregado reciclado (CONARM25, CONARM50, CONARM75 e CONARM100).

Sendo assim, para o processo de obtenção e fabricação do cimento CPV – ARI, foi utilizado a base de dados internacional Ecoinvent, cujo processo adotado foi a produção de cimento Portland {BR} (*Cement Portland {BR} | production | Cut-off, U*), onde contém informações desde o estoque de clínquer até o cimento pronto para ser enviado a granel ou ensacado. Enquanto isso, para o agregado graúdo (brita) foi adotado o processo de operação da pedreira de basalto {RoW} (*Basalt {RoW}| quarry operation | Cut-off, U*), que inclui a etapa de mineração, beneficiação, britagem, lavagem e classificação. Já, para o agregado miúdo (areia) foi utilizado infraestrutura de pedreira de cascalho e areia {RoW} (*Gravel/sand quarry infrastructure {RoW}| gravel/sand quarry construction | Cut-off, U*). Entretanto para as emissões para o ar, solo e água foram considerados os dados primários definidos na pesquisa de Ocharán, Lima e Lovón (2019). Os autores afirmam, que os dados foram cedidos pela Companhia de Mineração Itabras, cujo procedimento foi adotado para o agregado reciclado, que teve a elaboração do seu inventário a partir das informações da Companhia de Soluções em Beneficiamento e Comércio de Resíduos Sólidos, que estão apresentados na Tabela 4.4.

A partir dos dados disponíveis, optou-se por realizar uma adaptação na matriz energética empregada nos processos para brasileira, pois de acordo com Reichert e Souza (2021) 80,4% da energia gerada no Brasil é de fonte renovável. Para isso, foi adotado o processo de eletricidade de média tensão {BR} (*Electricity, medium voltage {BR}| market for | Cut-off*).

Tabela 4.4 – Inventário do ciclo de vida para a produção de 1 tonelada de brita, areia e agregado reciclado

	Fluxo de Entrada	Unidade	Areia	Brita	Agregado Reciclado
Matérias-primas e insumos	Areia natural <i>in natura</i>	t	1,127	-	-
	Basalto	t	-	1,05	-
	RCC	t	-	-	1,25
	Explosivo (tovex)	kg	-	-	-
	Eletricidade	kWh	-	-	1,4824
	Água	m ³	-	-	0,001
	Diesel	l	-	-	0,8706
	Óleo lubrificante	l	-	-	0,0252
	Transporte	tkm	-	-	12,5000
Produtos; Coprodutos; Resíduos	Areia	t	1,0000	-	-
	Brita	t	-	1,0000	-
	Agregado reciclado	t	-	-	1,0000
	Fração de argila	t	0,1270	-	-
	Rejeito – Pedreira	t	-	0,0500	-
	Rejeito - Reciclagem	t	-	-	0,2500
Emissões para o ar	CO ₂	kg	3,5399	1,9445	4,7981
	CO	kg	0,0163	0,0124	0,0156
	CH ₄	kg	0,0082	0,0085	0,0086
	NO _x	kg	0,0368	0,0117	0,0428
	SO ₂	kg	0,0045	0,0046	0,0060
	SO ₄	kg	2,987E-06	9,332E-06	5,908E-06
	SO _x	kg	2,969E-06	4,486E-06	2,186E-06
	NMVOG	kg	0,0066	0,0021	0,0081
	Partículas < 10mm	kg	0,0042	0,0021	0,0048
	NH ₃	kg	0,0001	0,0005	9,766E-05
	N ₂ O _x	kg	0,0003	0,0014	0,0003
Etano/Metano – HFC, HCFC, HCC, CFC	kg	1,696E-05	9,254E-05	4,317E-05	
Emissão para a água	PO ₄	kg	9,400E-05	0,0002	0,0002
	NO ₃	kg	0,0003	0,0006	0,0002
	N	kg	2,021E-05	4,179E-05	2,364E-05
	Cl	kg	0,0114	0,0081	0,0160
	Na	kg	0,0059	0,0036	0,0082
	Mg	kg	0,0002	0,0001	0,0002
	Ca	kg	0,0008	0,0008	0,0011

Tabela 4.4 – Inventário do ciclo de vida para a produção de 1 tonelada de brita, areia e agregado reciclado (Continuação)

	Fluxo de Entrada	Unidade	Areia	Brita	Agregado Reciclado
Emissão para a água	K	kg	8,79E-05	4,763E-05	0,0001
	Zn	kg	2,302E-05	1,040E-05	4,279E-05
	P	kg	1,066E-06	1,424E-06	1,101E-06
	Fe	kg	9,1066E-05	0,0002	8,563E-05
Emissões para o solo	Óleos	kg	0,00052	0,00026	0,0007
	Zn	kg	1,54E-06	2,278E-06	9,946E-06
	Cu	kg	1,313E-07	2,131E-07	3,169E-07
	Fe	kg	3,093E-05	3,803E-05	3,784E-05
	B	kg	6,623E-08	3,228E-08	9,763E-08
	Cd	kg	1,267E-08	1,93E-08	1,133E-08
	Pb	kg	8,613E-08	1,171E-07	1,953E-07

Fonte: Adaptado de Ocharán, Lima e Lovón (2019)

Como pode-se observar, na Tabela 4.4 consta o inventário para obtenção das matérias-primas e fabricação dos agregados. Entretanto, a fronteira do sistema adotada foi do berço ao portão; por isso, é necessário estabelecer a distância entre o local da extração dos insumos e o local da fabricação dos concretos (Porto Alegre), conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Distância entre o fornecedor e o local de fabricação do concreto

Insumos	Unidade	Distância	Localização
Cimento CPV – ARI	km	40	Esteio
Areia	km	30	Porto Alegre
Brita	km	85	Montenegro
Agregado reciclado	km	80	Santo Antônio da Patrulha

Entretanto esse transporte não será realizado vazio. Por isso, foi necessário estabelecer o consumo dos insumos por m³ de concreto (Tabela 4.6), através do método IPT/EPUSP.

Tabela 4.6 – Quantitativo do consumo dos insumos para 1 m³ de concreto

Insumos	Unid	CONREF00	CONARM25	CONARM50	CONARM75	CONARM100
Cimento CPV – ARI	kg	283,02	346,84	427,59	534,55	547,26
Brita	kg	1.074,85	781,29	504,72	244,36	-
Areia	kg	929,04	827,87	710,72	567,69	526,25
Agregado reciclado	kg	-	260,43	504,72	733,09	951,98
Água	kg	180,61	182,89	187,12	194,23	192,05

Com o quantitativo de consumo por m³ de concreto, obtidos na Tabela 4.6, e a distância entre o local de extração e fabricação do concreto (Tabela 4.5) foi possível encontrar a tonelada-quilômetro que foi empregado na avaliação do ciclo de vida, conforme mostra a Equação 4.2.

$$tkm = \frac{I}{1000} * D \quad (4.2)$$

Onde: tkm= Tonelada-quilômetro (tkm); I= Quantitativo do consumo do insumo por m³ de concreto (t) (Tabela 4.6); D= Distância entre o local de extração e o local de fabricação do concreto (km) (Tabela 4.5).

Desta forma, foi possível determinar os índices de transportes para os concretos com agregados naturais e reciclado, conforme mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Índice de transporte dos insumos

Insumos	Unid	CONREF00	CONARM25	CONARM50	CONARM75	CONARM100
Cimento CPV – ARI	tkm	11,32	13,87	17,11	21,38	21,89
Brita	tkm	91,36	66,41	42,91	20,77	-
Areia	tkm	27,87	24,84	21,32	17,03	15,79
Agregado reciclado	tkm	-	20,83	40,38	58,65	76,16

Junior (2013) afirma que no Brasil na maioria das vezes o transporte de cargas é realizado por via rodoviária com caminhões pesados movidos a óleo diesel. Por isso, foi adotado para o transporte do cimento CPV- ARI: transporte de carga em caminhão 16-32 toneladas métricas, EURO5 {RoW} (*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton,*

EURO5 {RoW} | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U), e para os agregados o transporte de carga em caminhão 7,5-16 toneladas métricas, *EURO5 {RoW} (Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {RoW} | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | Cut-off, U)* da base de dados Ecoinvent, pois segundo Costa (2016) ele é equivalente ao PROCONVE P7 que está em vigor no Brasil desde 2012. E com base em todos os dados relativos ao transporte, foi possível montar o inventário dos agregados e cimento CPV-ARI, conforme apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Inventário do cimento CPV-ARI e dos agregados graúdo, miúdo e reciclado

Saídas conhecidas para a esfera tecnológicas.		Quantidade	Unidade	Grandeza
Cimento Portland CPV-ARI		1	kg	Massa
Entradas conhecidas da esfera tecnológica			Quantidade	Unidade
CONREF00	Transporte do Cimento Portland CPV-ARI (Tabela 4.7)	11,32	tkm	
CONARM25		13,87	tkm	
CONARM50		17,11	tkm	
CONARM75		21,38	tkm	
CONARM100		21,89	tkm	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológicas.		Quantidade	Unidade	Grandeza
Areia		1	Kg	Massa
Entradas conhecidas da esfera tecnológica			Quantidade	Unidade
CONREF00	Transporte da areia (Tabela 4.7)	27,87	tkm	
CONARM25	Transporte da areia (Tabela 4.7)	24,84	tkm	
CONARM50		21,32	tkm	
CONARM75		17,03	tkm	
CONARM100		15,79	tkm	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológicas.		Quantidade	Unidade	Grandeza
Brita		1	kg	Massa
Entradas conhecidas da esfera tecnológica			Quantidade	Unidade
CONREF00	Transporte da brita (Tabela 4.7)	91,36	tkm	
CONARM25		66,41	tkm	

Tabela 4.8 – Inventário do cimento CPV-ARI e dos agregados graúdo, miúdo e reciclado (Continuação)

Entradas conhecidas da esfera tecnológica		Quantidade	Unidade	
CONARM50	Transporte da brita (Tabela 4.7)	42,91	tkm	
CONARM75		20,77	tkm	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológicas.		Quantidade	Unidade	Grandeza
Agregado reciclado		1	Kg	Massa
Entradas conhecidas da esfera tecnológica		Quantidade	Unidade	
CONREF00	Transporte do agregado reciclado (Tabela 4.7)	-	tkm	
CONARM25		20,83	tkm	
CONARM50		40,38	tkm	
CONARM75		58,65	tkm	
CONARM100		76,16	tkm	

Após a obtenção do inventário dos insumos estabelecidos na Tabela 4.8 foi possível realizar o ICV dos concretos com agregado graúdo natural (CONREF00) e com agregado reciclado (CONARM25, CONARM50, CONARM75 e CONARM100), cuja resistência mecânica foi fixada em 32 MPa. Para tanto, foi utilizada a produção de concreto 30-32 MPa (*Concrete, 30-32 MPa | concrete production 30-32 MPa, RNA only | Cut-off, U*), contido na base de dados Ecoinvent. E a partir das informações disponíveis, optou-se por realizar adaptações no sistema de eletricidade e água: eletricidade, média tensão {BR} (*Electricity, medium voltage {BR}| market for | Cut-off*) e a água empregada foi a da torneira {GLO} (*Tap water {GLO}| market group for | Cut-off, U*), a fim de que a avaliação do ciclo de vida fique mais próxima da realidade brasileira (Anexo 01).

4.2.4.3. Caracterização dos Impactos Ambientais da Avaliação do Ciclo de Vida

A etapa da avaliação de impacto de ciclo de vida consiste na valoração da significância dos impactos ambientais advindos de um sistema ou produto, os quais podem ser avaliados através de comparação e/ou caracterização. Em geral, são

escolhidas categorias específicas a fim de interpretar as grandezas dos impactos produzidos na ACV em análise, conforme mostrado no Quadro 3.1 (ISO 14.040:2014).

Para a realização dos cálculos referentes aos impactos ambientais causados pelo sistema em análise, foi utilizado o software SimaPro, o método de avaliação CML2002 e os fatores de caracterização publicados no manual do sistema de dados do ciclo de vida de referência internacional (*International Reference Life Cycle Data System Handbook*) (ILCD, 2010), cujo mesmo utiliza uma abordagem orientada ao problema (ponto intermediário do mecanismo ambiental), que de acordo com Almeida (2012) são definidos como lineares, ou seja, os impactos causados são proporcionais ao seu fator de caracterização, conforme a Equação 4.3.

$$S_j = \sum_I Q_{ji} * m_i \quad (4.3)$$

Onde: S_j = representa o resultado do impacto na categoria de impacto j ; Q_j = representa o fator de caracterização que liga a carga ambiental (i) à categoria de impacto (j) (ADP, ADP-ff, GWP, ODP, HTP, FAETP, MAETP, TETP, POCP, AP e EP); m_i = representa a quantidade de carga ambiental do tipo (i) que é geralmente uma massa expressa em kg, m^3 ou m^2 ao ano, a depender do indicador analisado (ADP, ADP-ff, GWP, ODP, HTP, FAETP, MAETP, TETP, POCP, AP e EP).

Assim, para o cálculo do impacto ambiental em termos de substância equivalente, basta somar a multiplicação da massa de cada substância pelo seu fator de caracterização, que são encontrados através das equações apresentadas na sequência (ILCD, 2010; ALMEIDA, 2012; CRENNAN et al., 2019).

Em relação à categoria de depleção de recursos abióticos (ADP) e combustíveis fósseis (ADP-ff), Almeida (2012) afirma que a melhor alternativa para a determinação do fator de caracterização (FC), é o método baseado em depósitos totais e taxas de extração dos recursos naturais, através da Equação 4.4, onde o resultado é expresso em kg de Sb equivalente e MJ por kg.

$$ADP_j \text{ ou } ADP - ff_j = \sum_i \frac{P_i}{P_{ref}} * \left[\frac{R_{ref}}{R_i} \right]^2 \quad (4.4)$$

Onde: ADP_j ou $ADP\text{-}ff_j$ = representa o potencial de depleção abiótico e combustíveis fósseis do recurso (j) (kg); R_i = reserva de recurso abiótico medido na mesma unidade de m_i ; P_i = produção líquida do recurso (extração menos regeneração); P_{ref} = extração anual global do recurso abiótico de referência (antimônio) para ADP e (elefante africano) para $ADP\text{-}ff_j$; R_{ref} = reserva de recurso abiótico de referência (antimônio) para ADP_j e (elefante africano) para $ADP\text{-}ff$.

Para o aquecimento global (GWP), Almeida (2012) assevera que deve ser empregada a Equação 4.5 que foi desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), sendo expresso em kg de CO_2 equivalente.

$$GWP_i = \sum_i \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} \quad (4.5)$$

Onde: GWP_i = representa o potencial de aquecimento global do gás i pelo período de T anos (kg de CO_2 equivalente); a_i = efeito de uma unidade de massa de substância (i); $c_i(t)$ = representa a concentração do gás (i) no tempo (t); T = representa o horizonte de tempo (20 a 500 anos), porém para o CML2002 é empregado 100 anos.

Para encontrar o fator de caracterização da categoria de depleção da camada de ozônio estratosférico (ODP) deve ser empregada a Equação 4.6 que foi desenvolvida pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) (*World Meteorological Organisation*) e é expressa em kg de CFC-11 equivalentes.

$$ODP_i = \sum_i \frac{\delta[O_3]_i}{\delta[O_3]_{CFC-11}} \quad (4.6)$$

Onde: ODP_i = representa o potencial de depleção da camada de ozônio do gás (i) (CFC-11 equivalentes); $\delta[O_3]_i$ = representa a alteração na coluna de ozônio no estado equilíbrio devido à emissão anual da substância (i); $\delta[O_3]_{CFC-11}$ = representa a alteração na coluna de ozônio no estado de equilíbrio devido à emissão anual de CFC-11.

Para determinar o fator de caracterização da categoria de formação de ozônio fotoquímico (PCOP) deve ser empregada a Equação 4.7, desenvolvida pelo Laboratório de Harwel e é expressa em kg de etileno equivalentes.

$$POCP_i = \sum_i \frac{a_i/b_i}{a_{C_2H_4}/b_{C_2H_4}} \quad (4.7)$$

Onde: $POCP_i$ = representa o potencial de formação de ozônio fotoquímico; a_i = representa a alteração na concentração de ozônio devido a uma alteração na emissão do COV (i); b_i = emissão integrada do COV (i) até aquele tempo; a e $b_{C_2H_4}$ = parâmetros para substância de referência (o etileno).

Beek et al. (2020) afirmam que para determinar o fator de caracterização da categoria de acidificação (AP) o CML, recomenda o método RAINS (*Regional Air pollution Information and Simulation*), desenvolvido em Viena na Áustria pelo *International Institute for Applied System Analysis* (IIASA), através da Equação 4.8 e é expresso em kg de SO₂ equivalente (HEIJUNGS et al., 1992).

$$AP_{x,r} = \sum_i \frac{\sum_e A_{e \in j} * \frac{t_{r,x,j}}{CL_{e \in j}}}{\sum_e A_{e \in j} * \frac{t_{r,ref,j}}{CL_{e \in j}}} \quad (4.8)$$

Onde: $AP_{x,r}$ = potencial de acidificação da substância (x) na região (r); $A_{e \in j}$ = ecossistema (e) na célula de grelha (j); $CL_{e \in j}$ = carga crítica para o ecossistema (e) na célula de grelha (j); $t_{r,x,j}$ = fator de transporte da fração de $E_{r,x}$ depositada na grelha (j); $E_{r,x}$ = emissão da substância (x) na região (r); $E_{r,ref}$ = emissão da substância de referência na região (r).

De acordo com Heijungs et al. (1992), para a categoria de eutrofização (EP) o fator de caracterização deve ser definido através da Equação 4.9 e expresso em kg de PO₄³⁻ equivalente.

$$EP_i = \frac{V_i/N_i}{V_{PO_4^{3-}}/M_{PO_4^{3-}}} \quad (4.9)$$

Onde: EP_i = representa o potencial de eutrofização; V_i = potencial de contribuição para a eutrofização de um mol da substância (i); $V_{PO_4^{3-}}$ = potencial de contribuição para a eutrofização de um mol de PO_4^{3-} ; N_i = massa da substância (i) ($kg \cdot mol^{-1}$); M_{ref} = massa da substância de referência;

Entretanto Almeida (2012) sugere que a avaliação de eutrofização deve ser realizada, através de um método que inclui destino e exposição do meio, bem como, a variação da sensibilidade dos ecossistemas expostos.

Para determinar a toxicidade humana (HTP) foi empregado o modelo USES, cujo mesmo é baseado no método proposto por Heijungs et al. (1992) e apresentado na Equação 4.10, sendo expresso em kg 1,4 - diclorobenzeno equivalente.

$$HTP_{i,comp} = \frac{\sum_r \sum_s PDI_{i,ecomp,r,s} * E_{i,r} * N_s}{\sum_r \sum_s PDI_{1,4-DB,ar,r,s} * E_{1,4-DB,r} * N_s} \quad (4.10)$$

Onde: $HTP_{i,ecomp}$ = potencial de toxicidade humana para a substância (i) emitida para o compartimento de emissão ecomp; N_s = densidade populacional; $PDI_{i,ecomp,r,s}$ = dose diária prevista via forma de exposição (r) à escala (s) para a substância (i) emitida para o compartimento de emissão ecomp (dia^{-1}); $PDI_{1,4-DB,ar,r,s}$ = dose diária prevista para o 1,4-diclorobenzeno (dia^{-1}) $E_{i,r}$; $E_{i,r}$ = fator efeito, representando o impacto tóxico-humano da substância (i) dose diária aceitável via forma de exposição (r) (inalação ou ingestão) (dia); $E_{1,4-DB,r}$ = fator efeito, representando o impacto tóxico humano da substância 1,4- diclorobenzeno (dose diária aceitável via forma de exposição) (r) (dia).

Para a categoria de ecotoxicidade (Equação 4.11) Heijungs et al. (1992) desenvolveram o modelo USES-ACV para cinco subcategorias: água doce, água marinha, sedimentos de água doce, sedimentos de água marinha e terra, em diferentes horizontes de tempo.

$$FAETP, MAETP, TETP_{i,comp} = \frac{PEC_{i,ecomp} * E_i}{PEC_{1,4-DB} * E_{1,4-DB}} \quad (4.11)$$

Onde: $FAETP_{i,ecomp}$ = potencial de toxicidade aquática na água doce da substância (i) emitida para o compartimento de emissão ecomp; $MAETP_{i,ecomp}$ = potencial de

toxicidade em águas marinhas da substância (i) emitida para o compartimento de emissão ecomp; $TETP_{i,ecompe}$ = potencial de toxicidade terrestre da substância (i) emitida para o compartimento de emissão ecomp; $PEC_{i,ecompe}$ = concentração ambiental prevista na água doce, marinha e terrestre da substância (i) devido à sua emissão para o compartimento de emissão ecomp ($kg \cdot m^{-3}$); $PEC_{1,4-DB,ecompe}$ = concentração ambiental prevista na água doce, marinha e terrestre para a substância 1,4 - diclorobenzeno devido à sua emissão para o compartimento de emissão ecomp ($kg \cdot m^{-3}$); E_i = representa o impacto toxicológico da substância i no ecossistema água doce, marinha e terrestre ($m^3 \cdot kg^{-1}$); $E_{1,4-DB}$ = representa o impacto toxicológico da substância 1,4 - diclorobenzeno no ecossistema água doce ($m^3 \cdot kg^{-1}$).

Neste contexto, o objetivo da caracterização da avaliação do ciclo de vida é analisar e comparar a viabilidade da substituição entre o agregado graúdo natural pelo reciclado por categorias de impactos, e para isso, serão utilizados os valores gerados automaticamente pelo software SimaPro.

4.2.4.4. Normalização da Caracterização dos Impactos Ambientais da Avaliação do Ciclo De Vida

De acordo com Hélias, Esnouf e Finkbeiner (2019) quando os impactos ambientais de um determinado sistema são calculados, a saída geralmente compreende um conjunto de resultados com diversas unidades, conforme mostrado no Quadro 4.1, o que torna difícil comparar entre si a sua significância.

Por isso, nessa pesquisa a comparação entre as categorias de impactos, foi realizada através da normalização, que de acordo com a NBR 14.040 e NBR 14.044 (ABNT, 2014) é um elemento opcional da fase AICV, que tem como objetivo calcular a magnitude dos resultados do indicador de categoria em relação a algumas informações de referência, tais como: as emissões totais ou utilização de recursos para uma dada área (global, regional, nacional ou local), as emissões totais ou utilização dos recursos para uma dada área numa base *per capita*, entre outros. Consequentemente, é nessa etapa que ocorre a conversão dos resultados do inventário para a mesma unidade de medida, através da Equação 4.12.

$$N_j = \frac{S_j}{A_j} \quad (4.12)$$

Onde: N_j = representa o resultado normalizado da categoria de impacto j ; S_j = representa o resultado caracterizado da categoria de impacto j (dados obtidos no software Simapro) e A_j = representa o fator de normalização (dados obtidos no software Simapro).

O fator de normalização A_j representa a extensão do impacto na categoria (j), num determinado período de tempo e numa dada área, sendo calculado através da Equação 4.13:

$$A_j = \sum_i Q_{ji} * \Phi_i \quad (4.13)$$

Onde: Q_{ji} = representa o fator de caracterização para a categoria de impacto (j); Φ_i = representa o fluxo atual da carga ambiental (dados obtidos no software Simapro).

Sendo assim, nesse estudo foi empregada a normalização externa com abrangência global, pois segundo Wernet et al. (2016) esse método pode ser aplicado nas bases de dados dos inventários utilizados na ACV, ou seja, não depende de nenhuma outra fonte de informações.

Neste contexto, o objetivo da normalização da avaliação do ciclo de vida é estabelecer a porcentagem máxima de substituição entre o agregado graúdo natural e o reciclado.

4.2.5. Análise de sensibilidade do transporte do agregado reciclado

Nesta pesquisa foi realizada uma análise de sensibilidade do transporte do agregado reciclado até a central de produção dos concretos (Porto Alegre), cujo objetivo é verificar em qual distância a sua utilização não seria mais viável em termos ambientais e para isso, foi necessário variar a quilometragem (10 km) a partir da distância pré-estabelecida (Santo Antônio da Patrulha) para sua aquisição, conforme mostrado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Distância entre o fornecedor e o local de fabricação do concreto

Cenário	Unidade	Distância	Localização
Cenário 01	km	80	Santo Antônio da Patrulha
Cenário 02	km	90	-
Cenário 03	km	100	-
Cenário 04	km	110	-
Cenário 05	km	120	-
Cenário 06	km	130	-
Cenário 07	km	140	-
Cenário 08	km	150	-
Cenário 09	km	160	-

E através dessas distâncias (Tabela 4.9), da Tabela 4.5 e Equação 4.2 foi possível calcular a tonelada quilômetro (tkm) que deve ser empregada na realização das avaliações do ciclo de vida, a fim de mensurar as categorias de impactos com abrangência global, tais como: eutrofização, mudanças climáticas, depleção de recursos abióticos, depleção da camada de ozônio estratosférico, toxicidade em águas doces, marinha e terrestre.

4.2.6. Análise do custo de produção de 1m³ de concreto

A análise de custo da utilização do agregado reciclado para confecção dos concretos, foi realizada através da avaliação de custo, que é uma técnica empregada para ponderar a viabilidade econômica de um produto ou serviço. Assim sendo, nesta pesquisa foi avaliado o custo do m³ para fabricação do concreto com agregado graúdo natural e com agregado reciclado, através da Equação 4.14.

$$CT = \sum (C_{MP} + C_{MT}) * I \quad (4.14)$$

Onde: CT= custo total (R\$/km*kg); C_{MP} = custo do insumo (R\$/kg) (Tabela 4.10); C_{MT} = custo do transporte do insumo (R\$/km*kg) (Tabela 4.10); I= quantitativo do insumo (kg) (Tabela 4.6).

Isso ocorre, pois a fronteira adotada foi do berço ao portão, que considera o ciclo de vida do produto desde a extração da matéria-prima até a fabricação, e para a

obtenção desses valores foi realizado em janeiro de 2022 um levantamento de mercado. Para o cimento na empresa Pozosul, para brita na Dalpiaz Mineração, para areia na jazida Gomes e agregado reciclado na Trassil (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Valores de mercado para os insumos utilizado na produção do concreto (transporte e matéria-prima)

Insumos	Unid	Valor do transporte por km	Valor da matéria-prima por kg	Valor total
Cimento CPV – ARI	R\$/kg*km	0,05	0,60	0,65
Brita	R\$/kg*km	0,01	0,06	0,07
Areia	R\$/kg*km	0,01	0,05	0,06
Agregado reciclado	R\$/kg*km	0,01	0,03	0,04
Água	R\$/kg*km	-	0,01	0,01

Sendo assim, todos os resultados obtidos serão discutidos no capítulo a seguir, a fim de encontrar um material de menor impacto ambiental e melhor custo, ou seja, a melhor relação custo-benefício.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se neste capítulo os resultados alcançados nesta pesquisa no que se refere a análise de custo e avaliação do ciclo de vida, empregando-se os resíduos de construção civil como agregado graúdo para a confecção de novos concretos.

5.1. Caracterização dos Impactos Ambientais da Avaliação do Ciclo de Vida

A avaliação do inventário do ciclo de vida (ICV) dos concretos com agregado graúdo natural (CONREF00) e com agregado reciclado (CONARM25, CONARM50, CONARM75 e CONARM100), cuja resistência mecânica é de 32 MPa foi realizada através do método CML 2002 e teve como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais em diversas categorias.

A primeira delas foi a acidificação, que segundo Bueno (2014) refere-se aos impactos derivados dos processos que elevam a acidez nos corpos hídricos e nos solos, devido ao acúmulo de íons de hidrogênio, e de alumínio e à lixiviação de bases de cátions como os de cálcio, magnésio, potássio e sódio.

A mesma é causada devido às emissões atmosféricas e disposições de substâncias química acidificantes, tais como: óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e amônia (NH₃), e poderá afetar negativamente a fertilidade do solo comprometendo a capacidade da produção agrícola. Entretanto, ela é uma categoria de impacto onde a maioria dos seus efeitos ocorrem em escala regional (UGAYA; NETO; FIGUEIREDO, 2019).

Na Figura 5.1 observa-se que o potencial de acidificação para o concreto com agregado graúdo natural (CONREF00) foi de 213 kg de SO₂ equivalente.

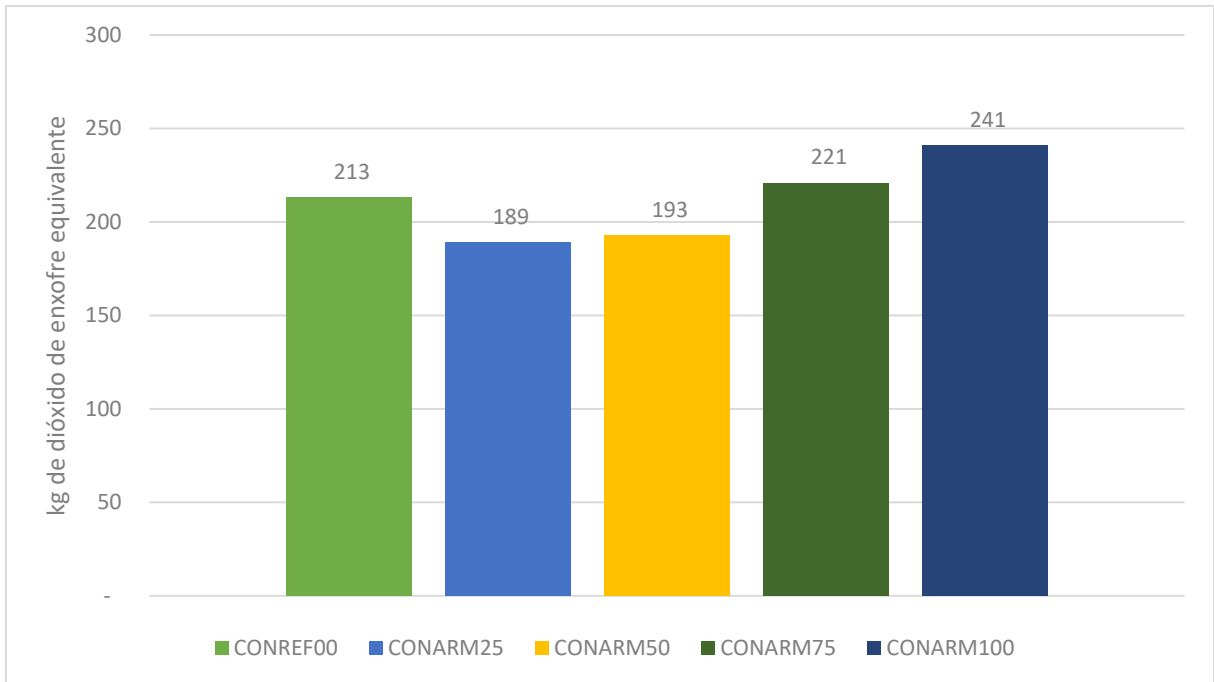


Figura 5.1 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de potencial de acidificação

Conseqüentemente, ele foi reduzido em 11,27% e 9,39%, após a substituição de 25% e 50% do volume total do agregado graúdo (CONARM25 e CONARM50). Entretanto, comutações superiores não trouxeram benefícios nessa categoria, devido ao aumento na quantidade de cimento, que é o maior contribuinte do impacto ambiental do concreto. Por isso, Hafez et al. (2019) acreditam que a elevação desse insumo não deva ultrapassar 10% em comparação ao concreto com agregado natural. Além disso, sugere-se a utilização de superplastificantes, já que ele aumenta a trabalhabilidade e compactação do concreto devido a dispersão das partículas do cimento, e reduz entre 15% e 40% o consumo de água.

Outra categoria com aplicação regional é a toxicidade humana, que é ocasionada pelas substâncias químicas com alto teor venenoso que atingem o ser humano através do ambiente. De acordo com Bueno (2014), a sua exposição ocorre por meio do ar inalado ou através de outros materiais ingeridos oralmente, como por exemplo, os alimentos.

Segundo Tonon (2019), ela é uma categoria extremamente sensível a algumas emissões liberadas durante a fase de clínquerização do cimento, tais como: emissão de arsênio, cobre e cádmio. Por isso, nos concretos CONARM75 e CONARM100 a

comutação de 75% e 100% dos agregados graúdos pelo reciclado, acarretaram a elevação de 6,48% e 19,43% na categoria de toxicidade humana. Entretanto, a substituição nos concretos CONARM25 e CONARM50, diminuíram em 12,23% e 10,07% conforme mostrado na Figura 5.2.

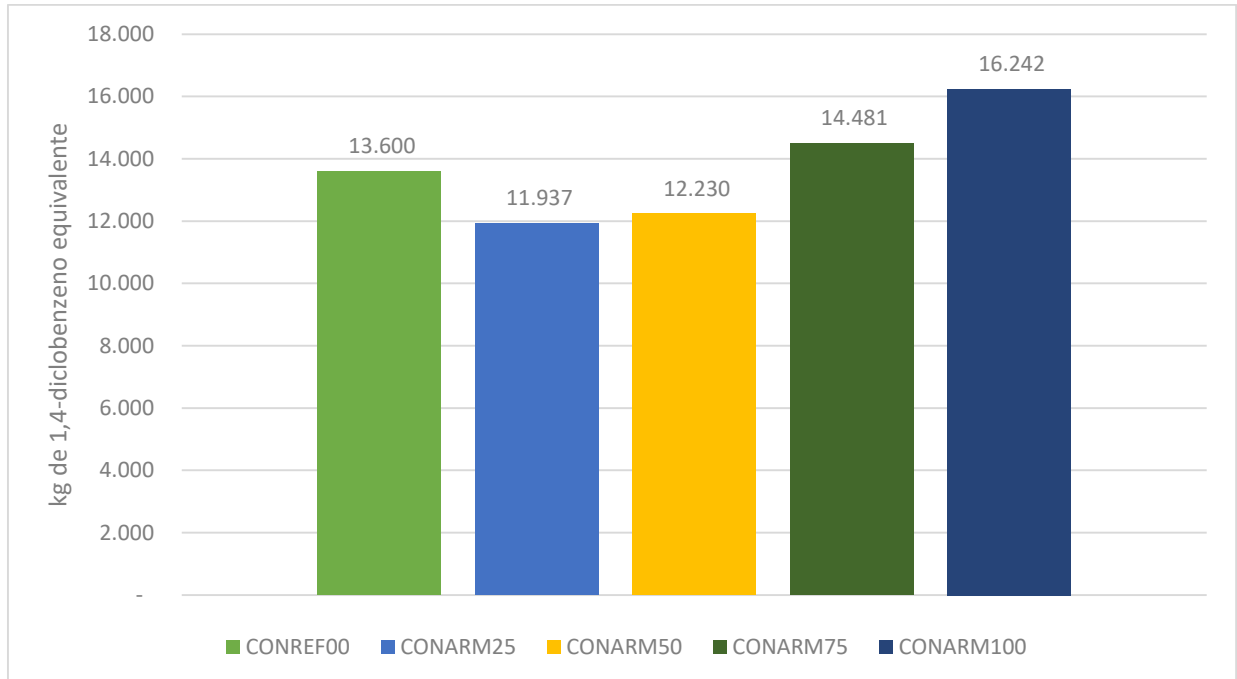


Figura 5.2 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto toxicidade humana

A oxidação fotoquímica também possui uma abrangência local e caracteriza-se pela formação de uma névoa seca, rica em diversos compostos orgânicos oxigenados e de uma grande quantidade de radicais livres (GIROTTI, 2018).

De acordo com o autor, o ozônio é o principal e mais reativo gás dessa categoria, é incolor e inodoro nas concentrações ambientais e é considerado um composto fotoquímico secundário, logo, não é emitido diretamente. Sendo assim, sua formação ocorre a partir de reações fotoquímicas (radiação solar) e outros compostos emitidos para a atmosfera por fontes difusas (veículos) e/ou pontuais (indústrias). Quando formado na estratosfera o ozônio é um gás essencial, pois filtra os raios ultravioletas emitidos pelo sol, que são nocivos à saúde. Porém, quando formado na baixa troposfera é extremamente tóxico e perigoso à saúde da população e ao meio ambiente, o que acaba contribuindo para a depleção do ozônio estratosférico, que pode acarretar câncer de pele e catarata em humanos, redução do crescimento das

plantas e da produção de fitoplâncton o que implicaria com toda a cadeia alimentar marinha.

Preocupados com os efeitos nocivos à saúde humana, Hafez et al. (2019) realizaram uma avaliação do ciclo de vida, a fim de analisar a oxidação fotoquímica de 1m³ de concreto com diferentes quantidades de cinza volante (0%, 30% e 60%) e agregado reciclado graúdo (0% e 100%), cujos os autores concluíram que ela diminuiu entre 22% e 45% quando 30% e 60% do cimento foi substituído por cinza volante, e reduziu cerca de 16% quando o agregado graúdo foi totalmente alterado pelo agregado reciclado.

Tendência semelhante pode ser vista na Figura 5.3, onde verificou-se uma diminuição de 5,75%, 6,5% e 2,38% nos concretos CONARM25, CONARM50 e CONARM75. Entretanto, para o CONARM100 verificou-se uma elevação de 15,25%. Isso ocorreu, porque o potencial de oxidação fotoquímica deve-se à emissão de CO, SO₂ e NO_x e para produção do agregado reciclado ele é significativamente menor que em relação ao agregado natural.

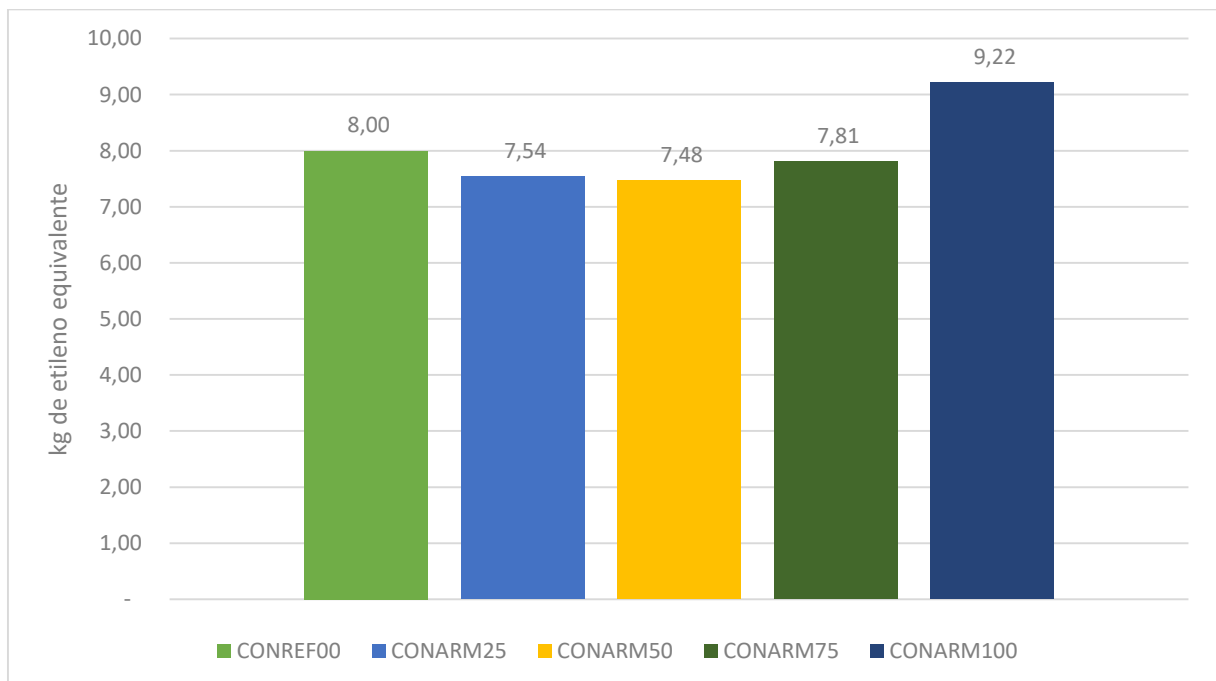


Figura 5.3 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto oxidação fotoquímica

Evangelista e De Brito (2007) citam que ao empregar agregado reciclado miúdo em concretos resultou em uma minimização de 6% e 23% da categoria de depleção de ozônio estratosférico, quando 30% e 100% do agregado natural foi substituído, respectivamente. No presente trabalho, essa comutação reduziu em 15,08% e 12,76% quando eles foram substituídos por 25% e 50% do agregado graúdo pelo reciclado, conforme apresenta a Figura 5.4.

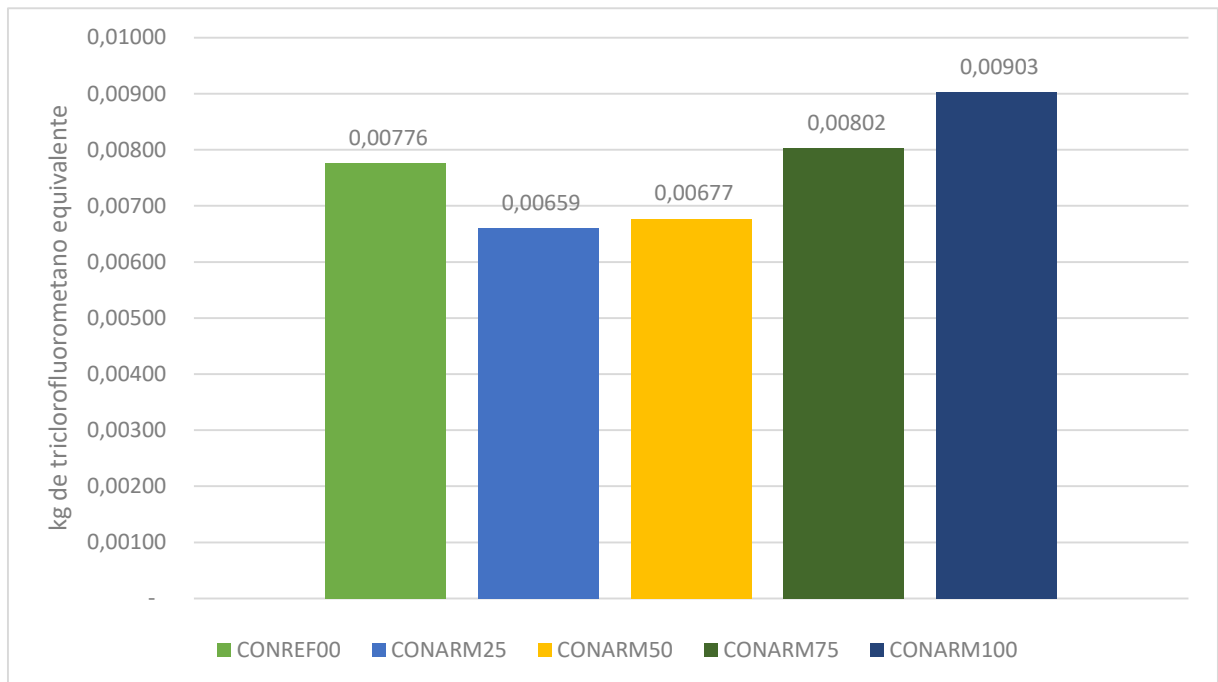


Figura 5.4 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto depleção do ozônio estratosférico

A eutrofização também é responsável por influenciar nos ecossistemas terrestres e aquáticos, acarretando em problemas de toxicidade, o que contribui na redução da biodiversidade da flora e da fauna, e da produção agrícola (MARTINS, 2017).

Posto isto, Marinković et al. (2010), Marinković, Malešev e Ignjatović (2013) realizaram uma ACV de traços de concreto feitos com 0%, 19% e 38% de cinza volante e com agregado graúdo totalmente alterado pelo reciclado, e concluíram que substituir o cimento por 38% de cinza volante e 100% de agregado reciclado não diminui a eutrofização, devido às grandes quantidades de poluentes transportados pelo ar emitidos por usinas a carvão no processo de produção de eletricidade.

Todavia, De Schepper et al. (2014) avaliaram os impactos ambientais de duas misturas com adição de resíduos de concreto e perceberam que o desempenho ambiental foi superior (redução de 6% a 10%) às misturas de referência, semelhante aos dados apresentados na Figura 5.5, pode-se observar que o desempenho da eutrofização foi elevada (redução de 6,53% e 4,02%) nos concretos CONARM25 e CONARM50.

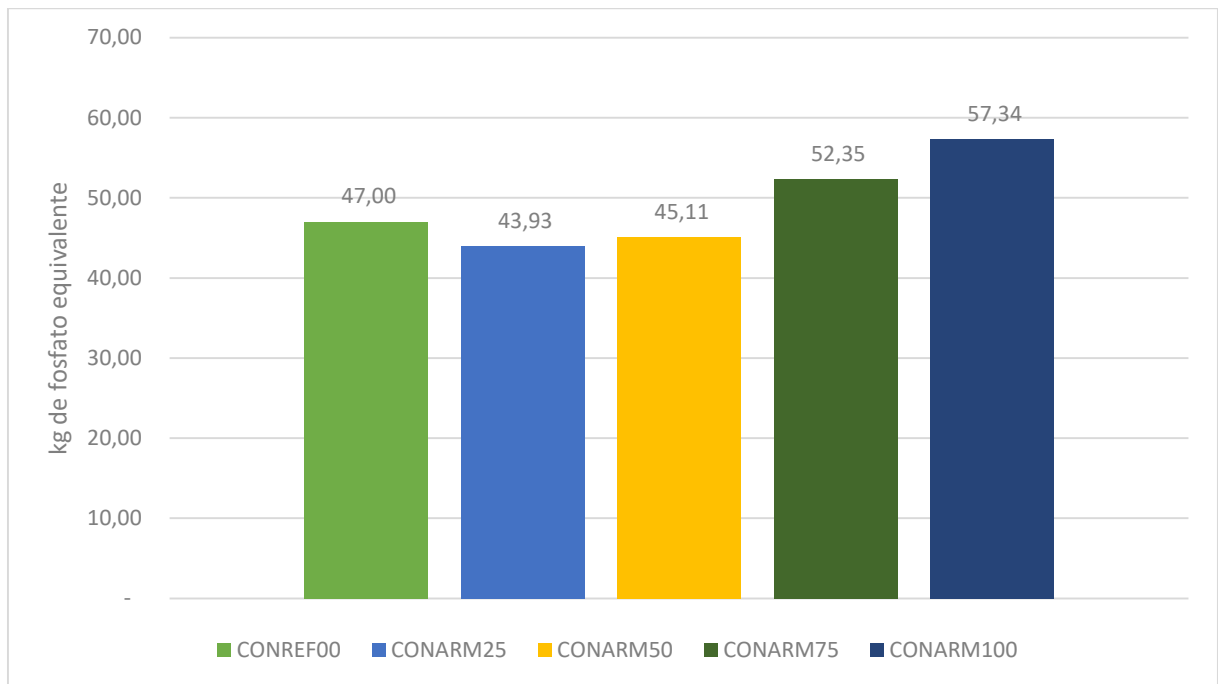


Figura 5.5 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de eutrofização

Além disso, Marinković et al. (2010) compararam os impactos ambientais dos concretos com agregado natural e com agregado reciclado, utilizando como unidade funcional 1m³ desses agregados, e concluíram que apesar de ter uma pequena participação na massa do concreto, o cimento é o emissor majoritário desse material, devido ao uso de combustíveis fósseis e ao processo de calcinação durante a produção do clínquer que de acordo com Costa et al. (2013) e Passuello et al. (2014) é responsável por aproximadamente 52% das emissões de CO₂. Entretanto, os autores afirmam que o transporte dos insumos avaliados teve uma grande contribuição nos impactos ambientais na categoria de depleção de recursos abióticos e combustíveis fósseis.

Sendo assim, pode-se observar na Figura 5.6 uma elevação de 4,46% e 17,69% nas substituições de 75% e 100% dos agregados graúdos, devido à necessidade de uma maior extração de combustíveis fósseis que serão empregados na produção e transporte dos insumos utilizados, principalmente o cimento. Consequente, Kurda, Silvestre e De Brito (2018) afirmam que ao adicionar 30% e 60% de cinza volante ao cimento a minimização passou a ser de 30% a 60% na categoria de impacto ADP-FF.

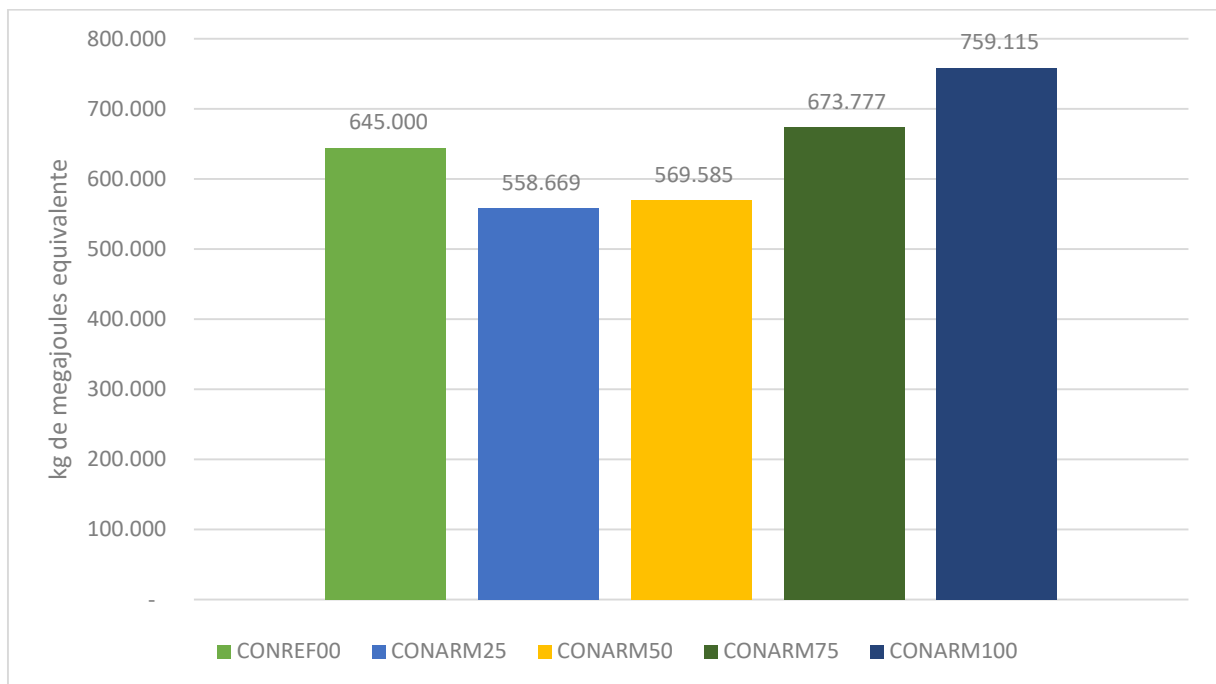


Figura 5.6 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de depleção de recursos abióticos de combustíveis fósseis

Enquanto isso, na Figura 5.7 verificou-se que a substituição de 25%, 50%, 75% do agregado graúdo (brita) pelo reciclado representou uma redução de 20%, 21,29% e 8,39% no potencial de depleção de recursos abióticos, que representa a diminuição da extração de recursos não vivos da natureza. Todavia, Paula (2016) afirma que a substituição de 10%, 20%, 30% e 40% do teor de cimento por resíduos cerâmicos reciclados, representou 8%, 14%, 20% e 28% de redução no potencial de depleção de recursos abióticos. Acredita-se, que essa tendência ocorra porque os impactos dessas categorias (ADP e ADP-FF) estão atribuídos ao cimento. Por isso, a alteração do volume dos agregados não afeta significativamente os resultados.

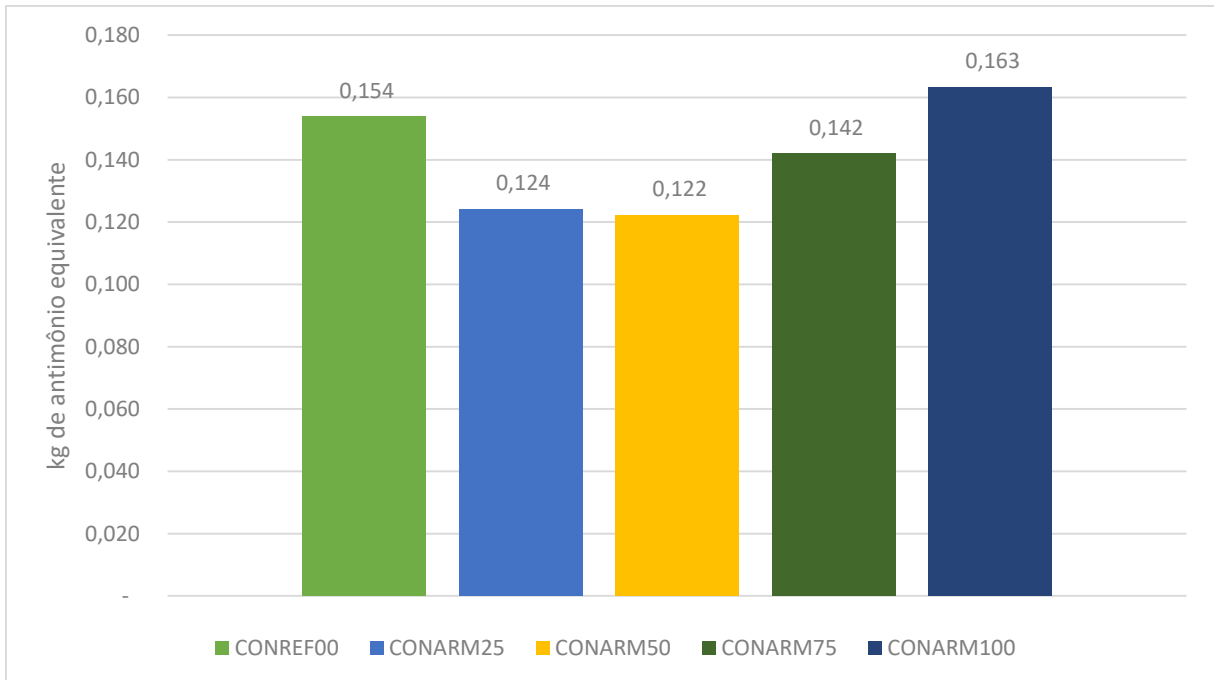


Figura 5.7 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de depleção de recursos abióticos

O transporte dos insumos também afetou os resultados das categorias de toxicidades marinha e em águas doces, pois ao comparar a pesquisa desenvolvida por Tonon (2019) que utilizou o mesmo objetivo, escopo, unidade funcional e fluxo de referência propostos por essa avaliação, percebeu-se que a autora obteve um menor desempenho nos concretos avaliados, conforme apresentado nas Figuras 5.8 e 5.9.

Isso aconteceu devido a escolha do transporte, já que ela empregou os modelos de caminhões EURO 3. Em contrapartida, nessa pesquisa foi utilizado um transporte mais moderno EURO V, que impõe limites mais reduzidos e exigentes de emissões de gases de escape para atmosfera. Segundo Costa (2016), no Brasil esses modelos são os do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE P-7), que tem como principal objetivo diminuir as emissões de óxido de nitrogênio (NO_x) em até 60%, quando comparada ao modelo EURO 3.

Observando-se as Figuras 5.8 e 5.9 foi possível concluir que o concreto sem adição de agregado gráudo natural (CONARM100), aumenta a toxicidade marinha em 12,7% e a toxicidade de águas doces em 11,94% quando comparado ao concreto sem agregado reciclado (CONREF00). Isso ocorre, devido à distância percorrida pelos resíduos de construção civil até a central de reciclagem/beneficiamento e produção

do concreto. Por isso, Marinković et al. (2010) afirma que essas distâncias tem uma grande influência na avaliação dos impactos ambientais.

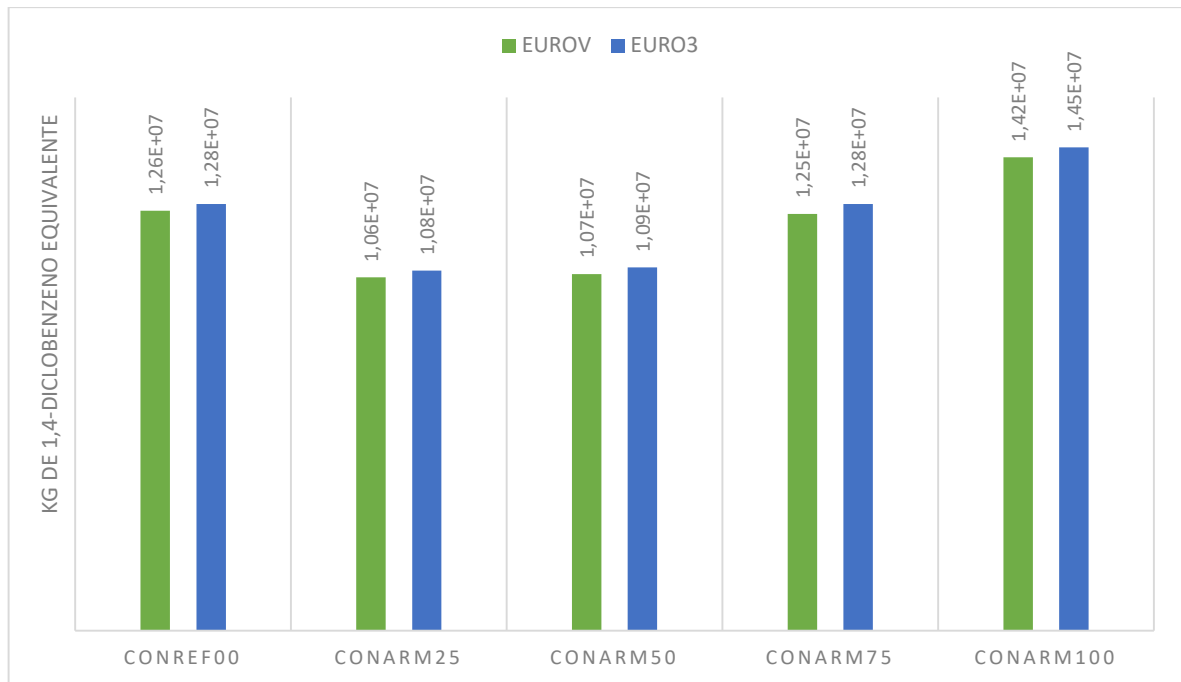


Figura 5.8 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de toxicidade marinha

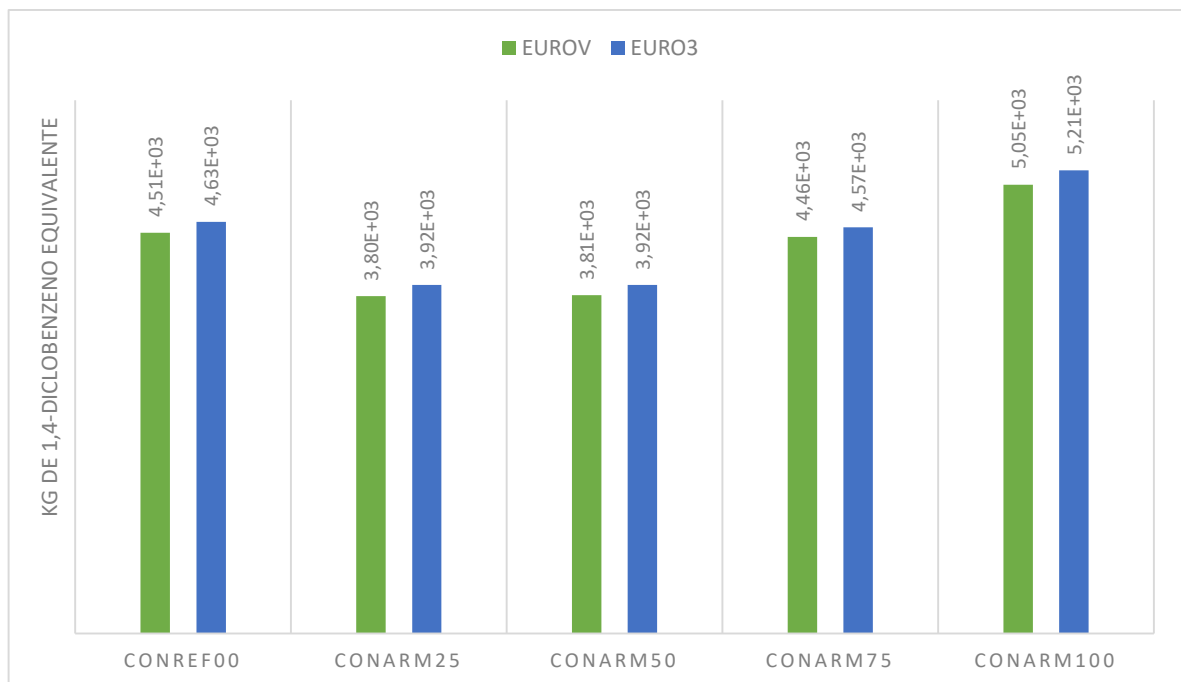


Figura 5.9 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de toxicidade em águas doces

Todavia, na categoria de toxicidade terrestre (Figura 5.10) ocorreu uma redução de 9,66% e 8,47% nos concretos CONARM25 e CONARM50, entretanto o CONARM75 e CONARM100 teve uma elevação de 3,31% e 12,85%.

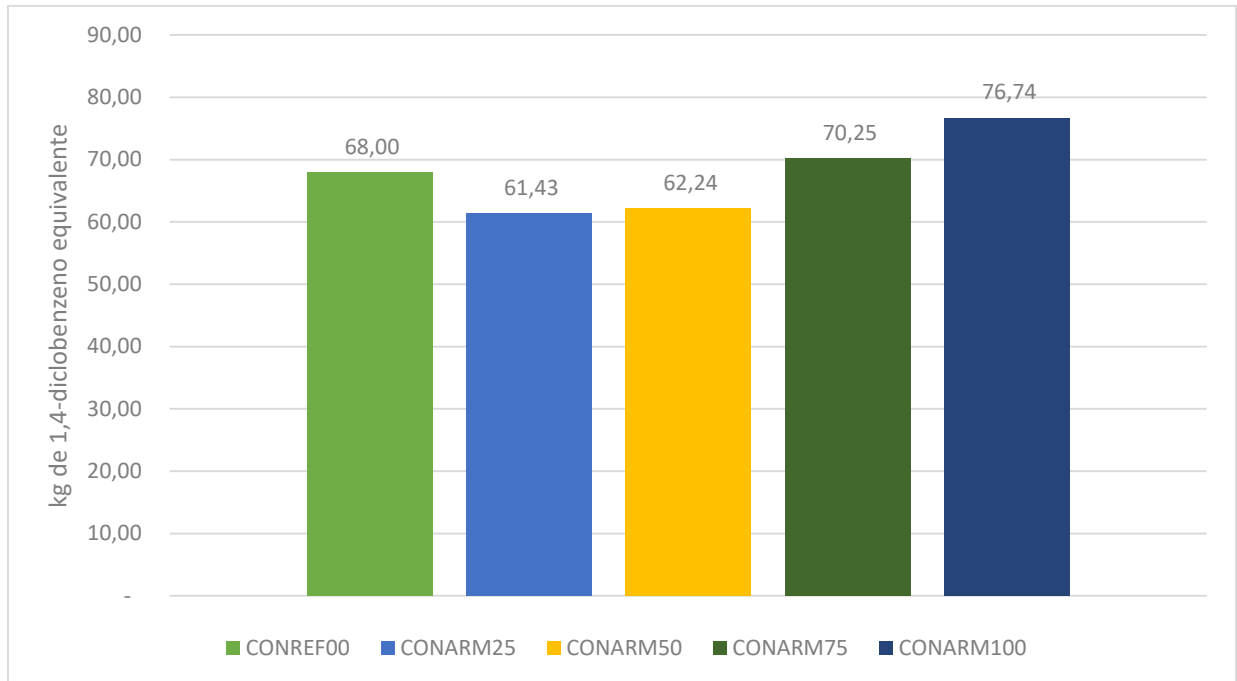


Figura 5.10 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de impacto toxicidade terrestre

Porém, a categoria mais importante é a de aquecimento global, pois de acordo com Wang, Geng e Casallas (2021) vive-se no período mais quente da história da civilização, e isso ocorre devido à emissão de gases do efeito estufa, tais como: o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4) e acredita-se que as atividades humanas são a causa dominante do aquecimento que vem impactando a saúde humana.

Sendo assim, na Figura 5.11 verificou-se que a categoria de aquecimento global é afetada principalmente pelo teor de cimento nos concretos. Por isso, a substituição de 25%, 50% e 75% do agregado graúdo (brita) pelo reciclado, representou uma redução de 14%, 14,6% e 2,84%, porém quando ele foi totalmente substituído ocorreu uma elevação de 7,51%.

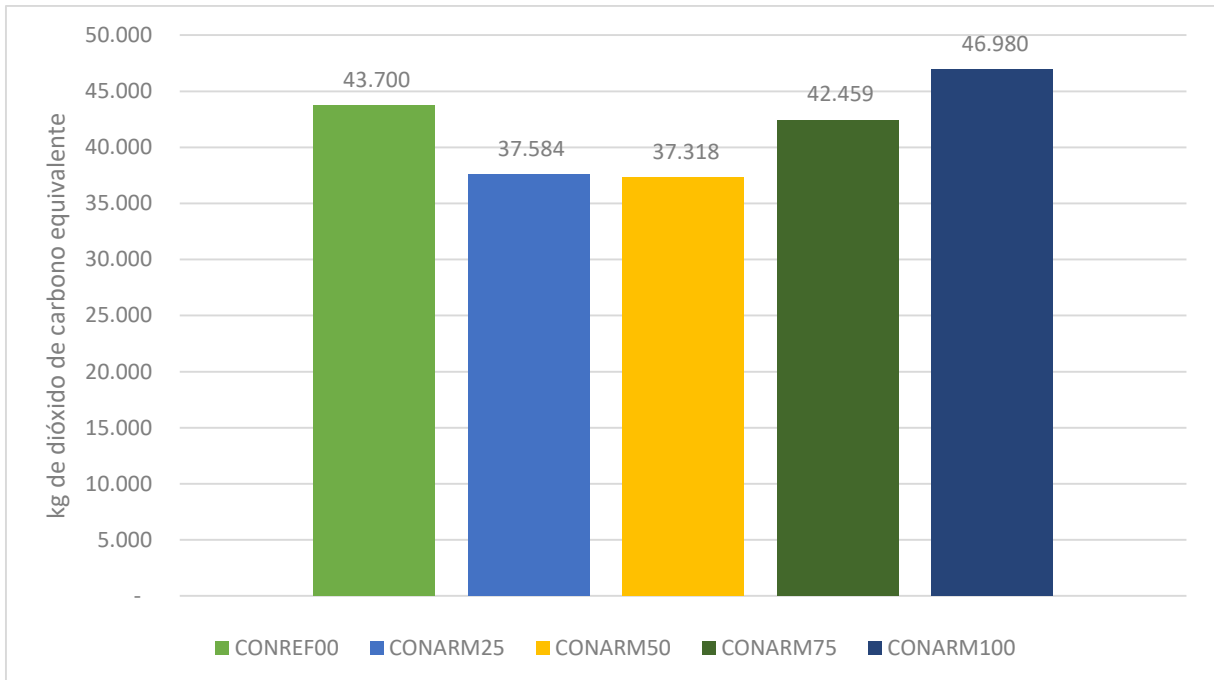


Figura 5.11 – Comparativo entre os concretos com agregados naturais e reciclado na categoria de aquecimento global

Na construção civil Schneider (2019) e He et al. (2020) afirmam que a indústria cimenteira emite 0,8 toneladas de CO₂ por toneladas de cimento produzido, o que acaba contribuindo de 6 à 7% nas emissões antrópicas globais de CO₂, o que corresponde a 5% das emissões de gases de efeito estufa. Sendo assim, Georgiopoulou e Lyberatos (2018) afirmam que ele é o responsável pela maioria dos impactos ambientais do concreto. Por isso, pesquisadores vem estudando a substituição de materiais virgens e cimento por subprodutos ou resíduos, com ou sem ativação alcalina (TOŠIĆ et al., 2015; MARINKOVIĆ, 2017; KURDA; SILVESTRE; DE BRITO, 2018).

5.2. Normalização da Avaliação do Ciclo de Vida

Segundo Bortolin (2009), o efeito dos impactos são mensurados em uma escala local, regional e global e podem ser observados no Quadro 4.1. Os impactos de efeito local são aqueles que apresentam influência num raio de poucos quilômetros de sua fonte geradora. Os impactos regionais causam efeitos num raio de 100 a 1000 quilômetros, dependendo da natureza do impacto e da sensibilidade do ambiente. Já os impactos de escala global têm influência em todo planeta, pois essas substâncias

são emitidas em grandes quantidades e geralmente apresentam alta mobilidade e vida longa no ambiente.

Sendo assim, essa pesquisa avaliou os impactos com efeito global, tais como: eutrofização, mudanças climáticas, depleção de recursos abióticos e combustíveis fósseis, depleção da camada de ozônio estratosférico, toxicidade em águas doces, marinha e terrestre. E para isso, foi realizada a normalização (Figura 5.12) da avaliação do ciclo de vida através das Equações 4.12 e 4.13.

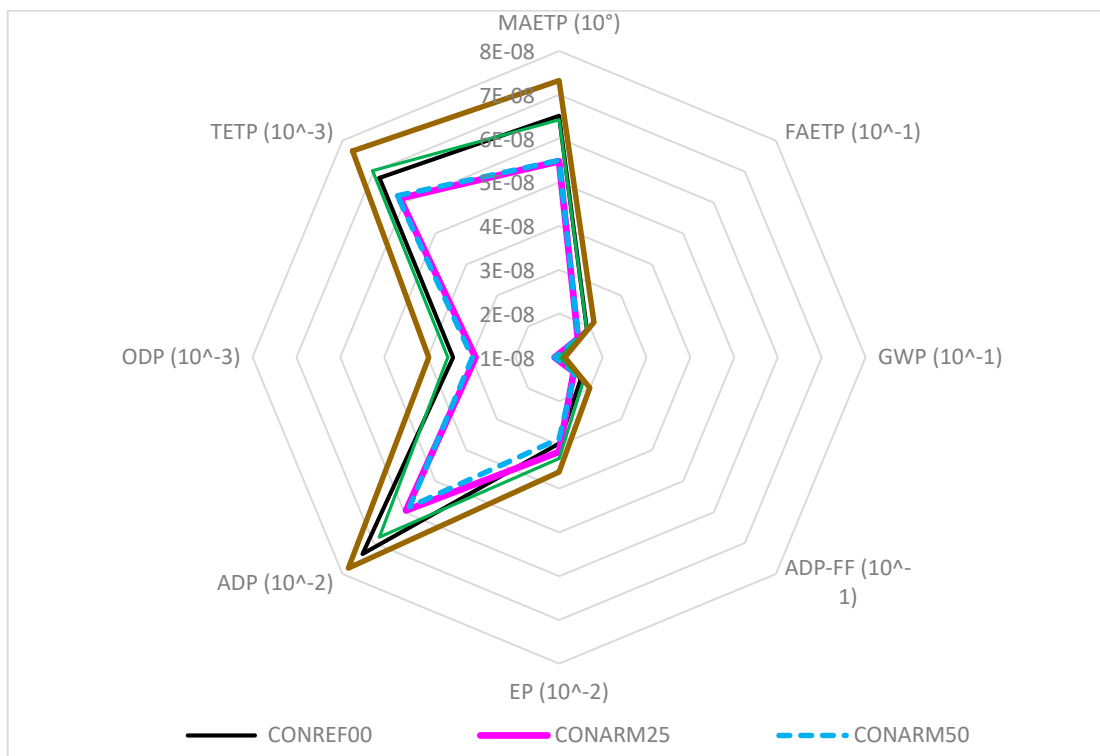


Figura 5.12 – Comparativo normalizado entre os concretos com agregados naturais e reciclado nas categorias de aquecimento global (GWP), eutrofização (EP), depleção de recursos abióticos (ADP), combustíveis fósseis (ADP-FF) e camada de ozônio estratosférico (ODP), toxicidade terrestre (TETP), marinha (MAETP) e em águas doces (FAETP)

Tabela 5.1 – Contribuição da substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado

Categorias	CONARM25	CONARM50	CONREF75	CONARM100
MAETP	-15,95%	-15,64%	+0,26%	+13,73%
FAETP	-15,26%	-14,74%	-0,53%	+12,11%
GWP	-14,67%	-14,76%	-2,86%	+7,62%

Tabela 5.1 – Contribuição da substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado (Continuação)

Categorias	CONARM25	CONARM50	CONREF75	CONARM100
ADP-FF	-13,53%	-11,76%	+4,71%	+17,06%
EP	-6,40%	-3,71%	+7,30%	+17,46%
ADP	-19,05%	-20,68%	-7,35%	+6,26%
ODP	-14,91%	-12,87%	+5,88%	+20,59%
TETP	-9,71%	-8,53%	+4,00%	+14,33%

Pode-se verificar na Figura 5.12 e Tabela 5.1 que a substituição de 25%, 50% e 75% do agregado graúdo pelo reciclado, representou uma redução de 19,05%, 20,68% e 7,35% no potencial de depleção de recursos abióticos. Porém, quando ele foi totalmente substituído ocorreu uma elevação de 6,26% na categoria de ADP, o mesmo aconteceu para a categoria combustíveis fósseis nas substituições de 75% e 100% dos agregados graúdos (4,71% e 17,06%), devido ao consumo de cimento Portland que é o emissor majoritário, representando 85% das emissões no ciclo de vida do concreto (LIMA, 2010; TEKLAY; YIN; ROSENDAHL, 2016; KAPPEL; OTTOSEN; KIRKELUND, 2017; GEORGIOPOULOU; LYBERATOS, 2018).

Por isso, pesquisadores vem realizando estudos que visem a comutação dos recursos naturais, por materiais com propriedades cimentícias, tais como: cinzas volantes, sílica ativa, cal, produtos residuais de diferentes processos, resíduos de óleo de palma, borracha de pneus, argilas e resíduos de construção civil, a fim de evitar o esgotamento das matérias-primas do cimento, areia e brita (LEMOUGNA; MACKENZIE; MELO, 2011; FEIZ et al., 2015; KUMAR et al., 2016; LEUNG et al., 2016; MANJUNATHA et al., 2021).

Além disso, percebeu-se que para a categoria de toxicidade em águas doces, ocorreu uma redução de 15,26%, 14,74% e 0,53% quando foi substituído 25%, 50% e 75% do volume do agregado natural, o que fez Brondani e Lamberti (2015), desenvolverem uma pesquisa a fim de comparar a utilização de diferentes tipos de cimento e concluíram que utilizar o CPIV reduz o impacto nessa categoria devido a relação água/cimento e a composição desse insumo, que possui menos clínquer quando comparado ao CPV-ARI.

A mesma tendência pode ser vista para o aquecimento global, com percentuais de redução de 14,67%, 14,76% e 2,86%. Hossain et al. (2016) comentam que isso ocorreu, pois para produzir 1 tonelada de agregado graúdo natural de pedra basáltica são emitidos 32 kg de CO₂, enquanto para produzir agregados reciclados a partir de resíduos de construção civil são emitidos 11 kg de CO₂, o que equivale a 65,63% a menos. Entretanto a comutação total não foi viável, devido ao elevado consumo de cimento CPV-ARI, que de acordo com Celik et al. (2015) é um insumo responsável por emitir 0,78 kg de CO₂ por kg de cimento produzido, o que acarretou numa emissão de 206,11 kg de CO₂ comparando-se o CONREF00 e o CONARM100.

Para as categorias de depleção da camada de ozônio estratosférica, eutrofização, toxicidade terrestre e marinha verificou-se que ocorreu o mesmo comportamento que a de depleção de recursos e combustíveis fósseis, ou seja, uma inviabilidade para teores de substituições superiores a 75% do volume do agregado graúdo natural. Ocorreu uma elevação de 4% e 14,33% na categoria de toxicidade terrestre, e uma adição de 0,26% e 13,73% na toxicidade marinha e um crescimento de 7,3% e 17,46% na categoria de eutrofização, além de um aumento de 5,88% e 20,59% na categoria depleção da camada de ozônio estratosférica, devido ao alto consumo de combustível, resultante da movimentação de veículos e maquinários e do transporte dos agregados naturais e reciclados.

Posto isto, ao observar a Figura 5.12 e a Tabela 5.1 percebe-se que a categoria com melhor desempenho ambiental foi a ADP, pois ao substituir o agregado natural pelo reciclado deixa-se de extrair matérias-primas da natureza. Entretanto, delimita-se que 50% é a viabilidade máxima de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado.

5.3. Contribuição dos Materiais Constituintes dos Concretos por Categoria de Impacto

Ao elaborar o inventário do ciclo de vida (ICV) foi possível realizar uma avaliação dos impactos ocasionados para a obtenção de 1kg de insumos a serem empregados nos concretos, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Emissões ambientais por kg de insumos produzidos

Categorias	Unidade	Cimento CPV – ARI	Brita	Areia	Agregado reciclado
ADP	Sb equivalente	5,45E-07	3,30E-07	4,69E-08	2,87E-08
ADP-ff	MJ	4,41E+00	2,23E-01	1,89E-01	1,69E-01
FAETP	1,4-DB equivalente	2,80E-02	3,30E-03	1,19E-03	1,60E-03
GWP	CO ₂ equivalente	9,27E-01	1,63E-02	1,29E-02	1,15E-02
HTP	1,4-DB equivalente	5,51E-02	5,72E-03	3,69E-03	4,95E-03
AP	SO ₂ equivalente	5,76E-03	8,35E-05	6,43E-05	4,48E-05
MAETP	1,4-DB equivalente	1,20E+02	9,99E+00	5,42E+00	3,55E+00
EP	PO ₄ ³⁻ equivalente	4,80E-04	2,46E-05	1,34E-05	1,10E-05
TETP	1,4-DB equivalente	6,74E-04	2,77E-05	1,42E-05	2,05E-05
POCP	C ₂ H ₄ equivalente	7,84E-05	3,90E-06	3,08E-06	2,14E-06
ODP	CFC-11 equivalente	2,50E-08	1,96E-09	1,39E-09	1,91E-09

Na Figura 5.13 pode-se observar que o maior contribuinte dos impactos ambientais do concreto é o cimento, pois de acordo com Cunha (2016) as altas emissões de carbono desse material, devem-se ao uso de combustíveis fósseis e ao processo de calcinação durante a produção do clínquer.

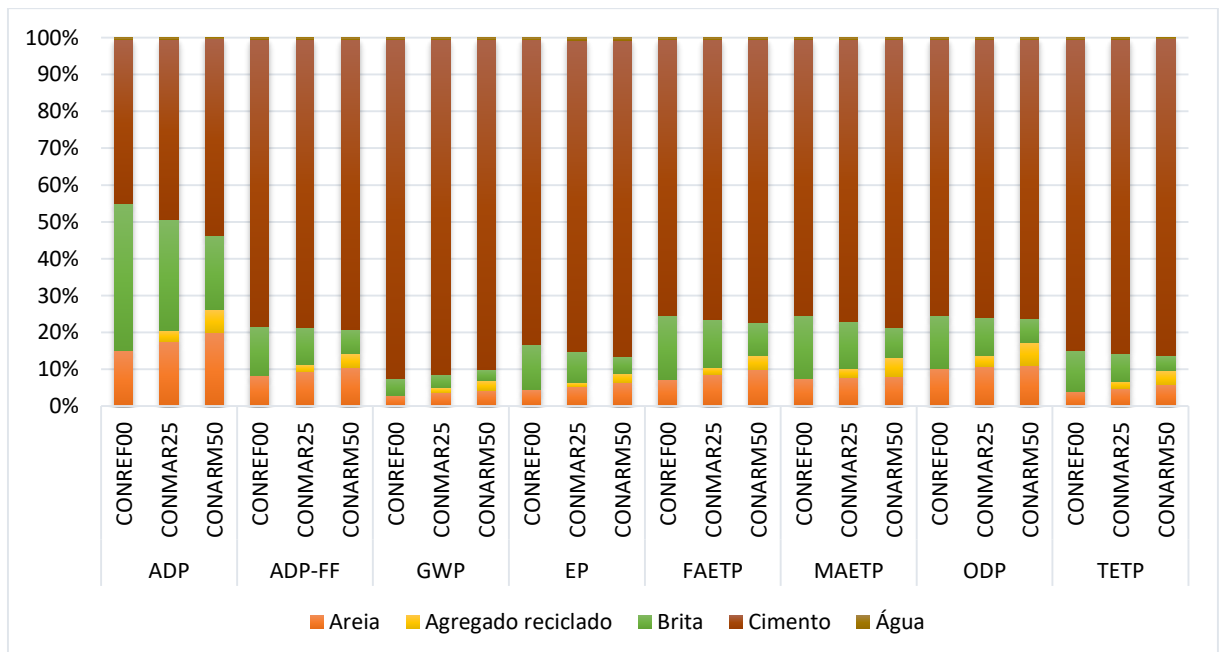


Figura 5.13 – Contribuição dos insumos constituintes dos concretos nas categorias de impacto global

Além disso, nas pesquisas desenvolvidas por Paula (2016) e Gehrke (2021) também foi possível observar que em todas as misturas avaliadas, o cimento Portland é o material que mais contribuiu para todas as categorias de impacto. Entretanto, os autores afirmam que essa contribuição é mais significativa na categoria potencial de aquecimento global, pois de acordo com Wang, Geng e Casallas (2021) vive-se no período mais quente da história da civilização, e isso ocorre devido às emissões de gases do efeito estufa. O mesmo ocorreu na pesquisa realizada, onde a contribuição nessa categoria chegou a 97%, conforme mostra as Figuras 5.13 e 5.14.



Figura 5.14 – Contribuição da produção e transporte dos insumos constituintes dos concretos CONREF00 (a), CONARM25 (b) e CONARM50 (c)

Na Figura 5.14 a extração e transporte da brita foi o segundo maior contribuinte na geração dos impactos. Entretanto, Gehrke (2021) assevera que a utilização de agregados reciclados poderá diminuir a contribuição desse insumo nas categorias avaliadas, pois ao utilizar um resíduo como agregado deixa-se de explorar os recursos naturais. O mesmo ocorreu nessa pesquisa, conforme demonstra a Figura 5.15.

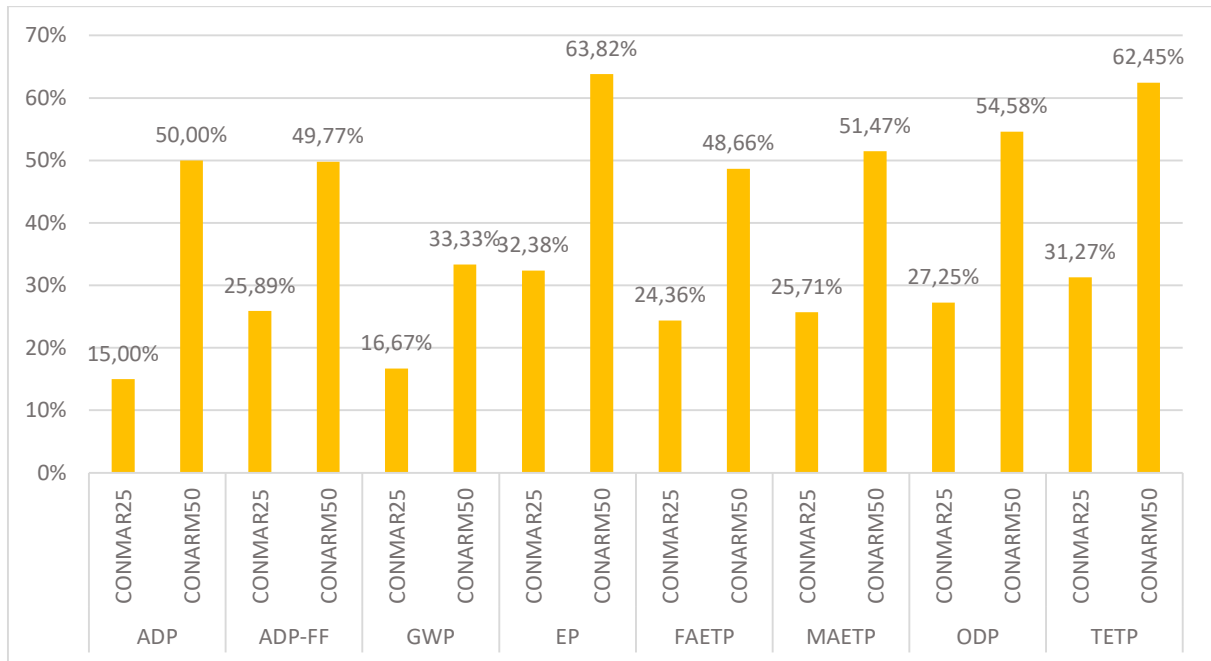


Figura 5.15 – Redução da contribuição do agregado natural com a incorporação do agregado reciclado

Sendo assim, ao adicionar agregado reciclado, se está despenalizando os impactos referentes ao agregado graúdo natural, o que acarretará no aumento da participação do cimento e irá auxiliar nas variações das contribuições dos materiais constituintes do concreto. Acredita-se que essas elevações e reduções ocorram, devido às alterações dos volumes dos insumos constituintes nos concretos estudados, visando manter a mesma resistência à compressão (32 MPa).

5.4. Avaliação da Sensibilidade do Transporte e Substituição dos Agregados Graúdos pelo Reciclado

Ao determinar a viabilidade máxima de substituição do agregado graúdo natural foi possível, empregando-se a Equação 4.2 encontrar a tonelada-quilômetro a ser

utilizada na avaliação da sensibilidade do transporte do agregado reciclado, conforme mostrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Tonelada-quilômetro para o transporte do agregado reciclado

Unid: tkm	CONARM25	CONARM50
Cenário 01	20,834	40,378
Cenário 02	23,439	45,425
Cenário 03	26,043	50,472
Cenário 04	28,647	55,519
Cenário 05	31,252	60,566
Cenário 06	33,856	65,614
Cenário 07	36,460	70,661
Cenário 08	39,065	75,708
Cenário 09	41,669	80,755

Com esses valores foi possível desenvolver os inventários dos concretos CONREF00, CONARM25 e CONARM50, a fim de mensurar e normalizar os impactos ambientais das categorias que possuem abrangência global por cenários.

Percebe-se na Figura 5.16, que nas categorias de aquecimento global, depleção de recursos abióticos e camada de ozônio, toxicidade em águas doces, marinha e terrestre as distâncias delimitadas entre os cenários 01 ao 09 não atingiu o impacto gerado pelo concreto CONREF00. Entretanto nas categorias de eutrofização a distância de 160km estabelecida no cenário 09, ultrapassou o valor encontrado no concreto sem substituição (CONREF00). O mesmo ocorreu na depleção de recursos abióticos combustíveis fósseis aos 130km, pois de acordo com Yazdanbakhsh et al. (2018) essas categorias são influenciadas pela queima do diesel empregado no transporte dos insumos utilizados na fabricação dos concretos.

E os gases provenientes da exaustão de motores a diesel são constituídos por uma mistura de compostos gasosos (tais como monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio) e material particulado (carbono, enxofre, nitrogênio, entre outros) que pode

acarretar danos ao meio ambiente e à saúde da população (INCA, 2012; IARC, 2014; INCA, 2021).

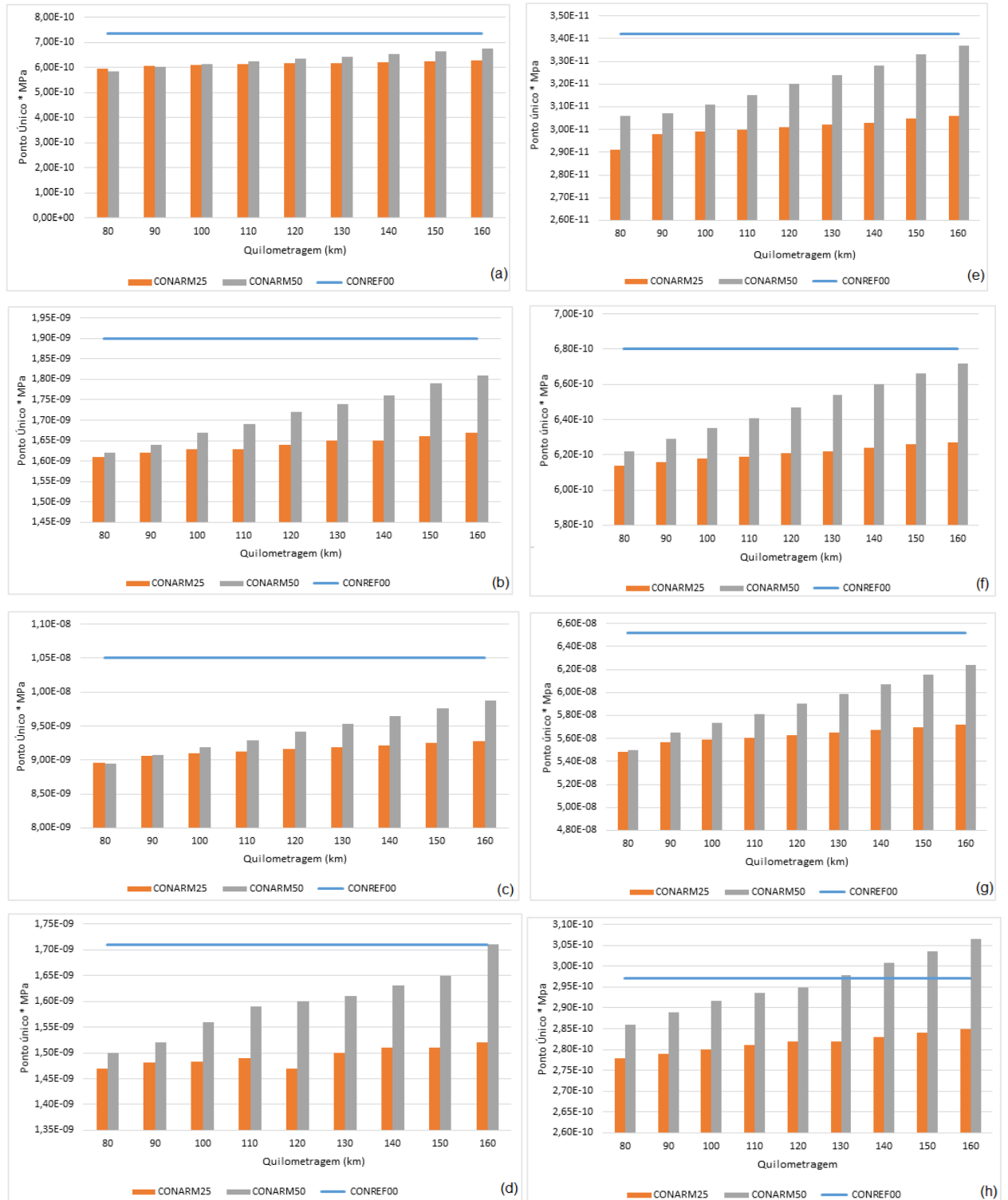


Figura 5.16 – Análise de sensibilidade dos concretos com agregados naturais e reciclado nas categorias de depleção de recursos abióticos (a), toxicidade em águas doces (b), aquecimento global (c), depleção de recursos abióticos combustíveis fósseis (d), depleção da camada de ozônio (e), toxicidade terrestre (f), toxicidade marinha (g) e eutrofização (h)

Sendo assim, abaliza-se que é viável buscar o agregado reciclado a uma distância máxima de 120 km, caso o mesmo seja utilizado para substituir até 50% do volume total do agregado graúdo natural.

5.5. Avaliação de Custo para Utilização de Agregado Reciclado

Alqahtani, Abotaleb e Elmenshawy (2021) asseguram que a introdução de agregados reciclados na mistura de concreto afeta no custo que, por sua vez, refletirá no valor de construção. Sendo assim, através da Equação 4.14 foi analisado o valor inicial dos insumos (Tabela 4.10) do berço ao portão, conforme apresenta a Figura 5.17, onde observou-se que ocorre um aumento de 7,98%, 19,33%, 35,72% e 34,9% nos valores do m³ do concreto quando comparado ao CONREF00.

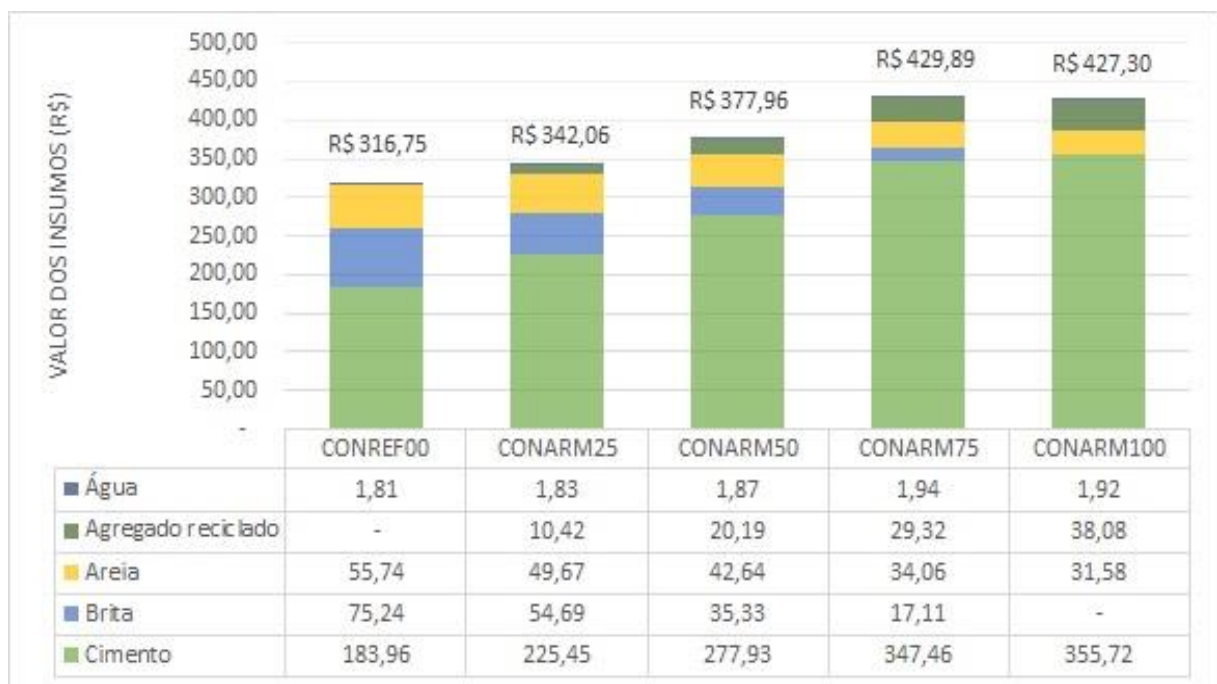


Figura 5.17 – Composição do custo do m³ do concreto em janeiro de 2022

Alqahtani, Abotaleb e Elmenshawy (2021) acreditam que isso ocorra porque ao substituir o agregado natural pelo reciclado a forma microscópica do concreto altera, pois ele apresenta uma porosidade, que tende a diminuir a resistência mecânica do concreto. Dabhade, Chaudar e Gajbhaye (2014) sugerem que este comportamento se deve à argamassa aderida em torno do resíduo de construção civil, que impede uma ligação adequada entre o substrato e o agregado reciclado. Entretanto Medina et al.

(2014), Cantero et al. (2019) e Rodríguez et al. (2020) asseveram que o efeito na diminuição da resistência à compressão axial está intimamente ligado aos materiais cerâmicos contidos nos resíduos de construção civil.

Sendo assim, para manter constante a resistência mecânica em 32 MPa (CONARM25, CONARM50, CONARM75 e CONARM100), foi necessário a elevação de 22,55%, 51,17%, 88,87% e 93,36% no consumo de cimento, o que contribuiu no aumento do custo do m³ do concreto, já que ele representa o insumo de maior valor. Porém, ao compararmos o custo unitário dos agregados graúdos percebe-se na Figura 5.18 que o menor valor é o do concreto CONARM100, pois em sua composição contém somente agregado reciclado que de acordo com a Tabela 4.10, custa 50% a menos que o agregado graúdo natural.

Entretanto, no presente trabalho delimitou-se que a viabilidade máxima de substituição do agregado graúdo natural (brita) pelo agregado reciclado deve ser de 50%, ocorrendo uma redução de 26,21% no valor de composição dos agregados graúdos (natural + reciclado) e 84,99% nos impactos ambientais, mesmo com a elevação do consumo de cimento.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho aplicou a metodologia de avaliação do ciclo de vida, estabelecida pelas normas ISO 14.040 e 14.044 (ABNT, 2014), de forma a comparar o desempenho ambiental, dos concretos produzidos com agregados naturais e reciclado. E para a realização desse comparativo foi desenvolvida a caracterização e normalização do desempenho ambiental dos concretos que é um elemento opcional, que consiste em um processo pelo qual todos os valores em estudo são relacionados a um valor de referência estabelecido, e convertidos em novos números dentro de uma mesma escala conhecida como ponto único (pt), ela é elaborada automaticamente pelo SimaPro, o que permitiu agrupamentos e comparações, afim de determinar o volume de substituição dos agregados naturais em relação aos reciclados.

Sendo assim, através da avaliação do ciclo de vida foi realizada primeiramente a caracterização do desempenho ambiental dos concretos com agregado graúdo natural (CONREF00) e com agregado reciclado (CONARM25, CONARM50, CONARM75 e CONARM100), e conclui-se que para as categorias de acidificação, toxicidade humana, depleção de ozônio estratosférico, eutrofização, toxicidade marinha, toxicidade em águas doces, depleção dos recursos abióticos a substituição máxima dos agregados deve ser de 50%. Enquanto, para as categorias de oxidação fotoquímica, aquecimento global, depleção de recursos abióticos e combustíveis fósseis, podem ser substituído até 75% do volume do agregado natural.

Porém, com os resultados da caracterização dos impactos ambientais não foi possível determinar o fator ótimo de substituição, pois cada categoria é dimensionada com uma unidade. Em vista disso, a avaliação do ciclo de vida passou por uma normalização, o que acabou demonstrando que o agregado natural pode ser substituído em até 50% do seu volume, o que acarreta numa redução de 84,99% dos

impactos ambientais, mesmo com a elevação do consumo de cimento. Sendo que a categoria de depleção de recursos abióticos foi a mais beneficiada, pois ao utilizar um resíduo deixa-se de explorar os recursos naturais, além de reduzir a área de descarte.

Em seguida foi analisada a contribuição da produção e transporte dos insumos empregados na confecção dos concretos, e percebeu-se que os maiores impactos ambientais ocorreram durante o processo de manufatura dos insumos. Sendo o cimento o maior contribuinte dos impactos ambientais dos concretos, e a categoria mais afetada foi a de aquecimento global.

Todavia, o segundo insumo de maior aporte foi a brita, por isso, realizou-se a substituição do agregado natural pelo reciclado (CONARM25 e CONARM50) e conclui-se uma redução dos impactos ambientais para todas as categorias: ADP (15 e 50%), ADP-FF (25,89 e 49,77%), GWP (16,67 e 33,33%), EP (32,38 e 63,82%), FAETP (24,36 e 48,66%), MAETP (25,71 e 51,47%), ODP (27,25 e 54,58%) e TETP (31,27 e 62,45%). Sendo a categoria de eutrofização a maior beneficiada pela comutação do agregado natural (brita + areia) pelo reciclado, pois a extração dos agregados naturais (brita e areia) muitas vezes geram contaminação e degradação dos cursos de água.

Após verificar-se que a etapa de manufatura gera os maiores impactos, foi realizada uma análise de sensibilidade do transporte e percebeu-se, que é viável buscar o agregado reciclado a uma distância máxima de 120 km, o que representa 40 km adicionais ao proposto para a realização da avaliação do ciclo de vida.

Consequentemente, conclui-se que ao utilizar um resíduo como agregado deixa-se de explorar os recursos naturais, tornando o concreto um material mais sustentável. Porém, ele também deve ser economicamente viável, por isso, foi analisado o custo dessas comutações, e percebeu-se uma elevação de 19,33% no preço do m³ do concreto, pois a avaliação do ciclo de vida utilizou como unidade funcional a resistência de 32 MPa e para isso, foi necessário aumentar 51,17% o consumo de cimento.

No entanto, quando comparado os valores do agregado reciclado e natural separadamente, percebeu-se que seu valor é 50% menor, o que o torna um material

sustentável. Entretanto, foi possível reduzir 26,21% no valor de composição dos agregados graúdos (natural + reciclado).

Distintivamente de outros autores (BRONDANI, 2015; KUHN et al., 2017; COPETTI, 2019; WASKOW, 2019) que avaliaram a gestão de resíduos de construção civil, neste trabalho foi analisado o dispêndio de sua utilização, através da elaboração de uma avaliação de custo (AC). Tal metodologia, foi empregada para calcular o custo inicial do m³ do concreto com o agregado natural e com o reciclado, pois segundo Alqahtani, Abotaleb e Elmenshawy (2021) a introdução de agregados reciclados na mistura de concreto poderá afetar no desempenho de custo que, por sua vez, refletirá no valor de construção.

Sendo assim, pode-se concluir que a pesquisa atingiu seu objetivo que era contribuir para uma avaliação de custo e ciclo de vida entre o concreto com agregado graúdo natural e com agregado, considerando um nível de resistência específico (32 MPa), diferentemente da grande maioria dos trabalhos publicados (SJUNNESSON, 2005; MARCEAU et al., 2007; KNOERI; MENGUAL; ALTHAUS, 2013; DONG et al, 2015; SILVA, 2015; BEREZUK, 2015; GRABASCK, 2016; BRAGA et al., 2017; FERRO, 2017; INGRAO et al., 2019; HAFEZ et al., 2019), que consideram a análise para uma unidade funcional referente a 1 m³ de material.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

No sentido de prosseguir com as investigações sobre as avaliações do ciclo de vida, colocam-se as seguintes sugestões:

- Nacionalizar o máximo de dados a serem empregados no inventário do ciclo de vida;
- Expandir o sistema do produto, incluindo as etapas de uso e descarte “berço ao túmulo”;
- Avaliar os benefícios e aspectos críticos relacionados ao sistema de gerenciamento dos resíduos de construção civil;

- Investigar o potencial de reaproveitamento dos resíduos de construção civil, através de uma ACV consequencial;
- Estender as aplicações da metodologia para outros tipos de resíduos de construção civil, tais como: vidro, rejeitos de mineração de pó de mármore e granito;
- Realizar as análises de incertezas relacionadas à etapa de manutenção em ACV;
- Avaliar os impactos evitados através da reciclagem dos resíduos de construção civil.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD ELHAKAM, A.; MOHAMED, A. E.; AWAD, E. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 421–427, 2012.

ABDMOULEH, Z.; ALAMMARI, R. A. M.; GASTLI, A. Review of policies encouraging renewable energy integration & best practices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 249–262, 2015.

ABOUHAMAD, M.; ABU-HAMD, M. Framework for construction system selection based on life cycle cost and sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118397, 2019.

ABRAHAM, J. J.; SARAVANAKUMAR, R.; EBENANJAR, P. E.; ELANGO, K. S.; VIVEK, D.; ANANDARAJ, S. An experimental study on concrete block using construction demolition waste and life cycle cost analysis. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

ABUKERSH, S. A.; FAIRFIELD, C. A. Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 4088–4094, 2011.

AHMAD, W.; AHMAD, A.; OSTROWSKI, K. A.; ASLAM, F.; JOYKLAD, P. A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00683, 2021.

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.

AL-HAMRANI, A.; KIM, D.; KUCUKVAR, M.; ONAT, N. C. Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, n. 2021, p. 106543, 2021.

ALBALAWNEH, A.; CHANG, T.-K. Review of the greywater and proposed greywater recycling scheme for agricultural irrigation reuses. **International Journal of Research - GRANTHAALAYAH**, v. 3, p. 16–35, 2015.

ALENCAR, M. H.; PRIORI, L.; ALENCAR, L. H. Structuring objectives based on value-focused thinking methodology: Creating alternatives for sustainability in the built environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 62–73, 2017.

ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, A. E. M.; AUDA, E. M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 28–41, 2014.

ALMEIDA, F. M. de. **Fluxo de emissões em atividades do poder executivo federal: o caso do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior**. 2012. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasil.

ALMEIDA, J.; RIBEIRO, A. B.; SILVA, A. S.; FARIA, P. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. **Journal of Building Engineering**, v. 29, 2020.

ALQAHTANI, F. K.; ABOTALEB, I. S.; ELMENSHAWY, M. Life cycle cost analysis of lightweight green concrete utilizing recycled plastic aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 40, 2021.

ARSHAD, M.; AHMED, M. F. Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 83–97, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. Panorama dos Resíduos no Brasil 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5.738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 46 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6.118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7.211: Agregados para Concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 14.040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14.044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014. 46 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14.067: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 15.115 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos Rio de Janeiro, 2019. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 15.116 - Agregados reciclados para uso em argamassa e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 16.915: Agregados - Amostragens. Rio de Janeiro, 2021. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

BARRETO, M. F. F. M.; TIMM, J. F. G.; PASSUELLO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, J. R. Life cycle costs and impacts of massive slabs with varying concrete cover. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 5, 2021.

BARROS, M. C. de. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema decobertura**. Rio de Janeiro. 2005. 146. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

BEEK, L. Van; HAJER, M.; PELZER, P.; VUUREN, D. Van; CASSEN, C. Anticipating futures through models: the rise of Integrated Assessment Modelling in the climate science-policy interface since 1970. **Global Environmental Change**, v. 65, p. 102191, 2020.

BEGUM, R. A.; SIWAR, C.; PEREIRA, J. J.; HAMID JAAFAR, A. A benefit-cost analysis on the economic feasibility of construction waste minimisation: The case of Malaysia. **Resources Conservation e Recycling**, v. 48, p. 86–98, 2006.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; MINOCHA, A. K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501–516, 2014.

BENHELAL, E.; SHAMSAEI, E.; RASHID, M. I. Challenges against CO2 abatement strategies in cement industry: a review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 104, p. 84–101, 2021.

BENTO, R. C.; CARDOSO, P. F.; KOMESU, A.; OMETTO, A.R.; ROSSI, E.; ROSSIGNOLO, J .A. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Anais do 55º Congresso Brasileiro de Concreto, 2013.

BENTO, R. C. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado : uso da avaliação do ciclo de vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento**. São Carlos. 2016. 216 p. Tese (Doutorado em Ciências da Arquitetura e Urbanismo). Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, Brasil.

BEREZUK, F. D. **Avaliação do ciclo de vida do concreto convencional com cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial da areia**. Maringá. 2015. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Brasil.

BERGSDAL, H.; BOHNE, R. A.; BRATTEBO, H. Projection of Construction and Demolition Waste in Norway. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, p. 27–39, 2007.

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.

BLENGINI, G. A.; DI CARLO, T. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 869–880, 2010.

BODDU, V. M.; PAUL, T.; PAGE, M. A.; BYL, C.; WARD, L.; RUAN, J. Gray water recycle: Effect of pretreatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 4, Part A, p. 4435–4443, 2016.

BÖKE, H.; AKKURT, S.; IPEKOĞLU, B.; UĞURLU, E. Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 6, p. 1115–1122, 2006.

BORTOLIN, A. R. **Avaliação do ciclo de vida: principais métodos e estudo comparativo entre o cesto de plástico e de inox de uma lavadora de roupa**. São Carlos. 2009. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

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.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357**, de 15 de junho de 2005.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a **Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a lei nº . 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília - DF.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015.

BRAVO, M. et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 357–369, 2015.

BRAVO, M.; BRITO, J. de; EVANGELISTA, L.; PACHECO, J. 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.

BRITISH STANDARD - BS. ISO 15.686-5: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing. Genève, 2017. 54 p.

BRONDANI, R. P. **Avaliação do ciclo de vida e do custo de uma edificação de concreto estrutural com diferentes traços: estudo do berço ao portão**. Santa Maria. 2015. 226 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

BUENO, C. **Avaliação de ciclo de vida na construção civil: análise de sensibilidade**. São Carlos. 2014. 266 p. Tese (Doutorado em Ciências da Arquitetura e Urbanismo). Instituto de Arquitetura, Urbanismo da Universidade de São Paulo, Brasil.

BUSARI, Yobami. The use of construction and demolition waste as a recycled aggregate in sustainable concrete production: workability, strength and durability properties. **Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management**, p. 63-84, 2022.

CAETANO, M. O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 51–67, 2016.

CAMPOS, F. H. A. **Análise do ciclo de vida na construção civil: um estudo comparativo entre vedações estruturais em painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto**. Belo Horizonte. 2012. 123 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

CANTERO, B.; SÁEZ DEL BOSQUE, I. F.; MATÍAS, A.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; MEDINA, C. Inclusion of construction and demolition waste as a coarse aggregate and a cement addition in structural concrete design. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 4, p. 1338–1352, 2019.

CARVALHO, M. B. M. de. **Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal**. Brasília. 2008. 162 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável). Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasil.

CASTAÑEDA, J. S. Contextualización y enfoques en el estudio de comportamientos proambientales o ecológicos con miras a la perfilación del consumidor verde. **Suma de Negocios**, v. 5, n. 10, p. 34–39, 2014.

CASTRO, A. L.; SILVA, F. B.; ARDUIN, R. H.; OLIVEIRA, L. A.; BECERE, O. H. Análise da viabilidade técnica da adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro : um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local. In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto, Bonito. **Anais...** Bonito: 2015.

CELIK, K.; MERAL, C.; PETEK GURSEL, A.; MEHTA, P. K.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59–72, 2015.

CHANDRAKUMAR, C.; MCLAREN, S. J.; DOWDELL, D.; JAQUES, R. A science-based approach to setting climate targets for buildings: The case of a New Zealand detached house. **Building and Environment**, v. 169, p. 106560, 2020.

CHAU, C. K.; YIK, F. W. H.; HUI, W. K.; LIU, H. C.; YU, H. K. Environmental impacts of building materials and building services components for commercial buildings in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 18, p. 1840–1851, 2007.

CHEN, G.; WANG, X.; LI, J.; YAN, B.; WANG, Y.; WU, X.; VELICHKOVA, R.; CHENG, Z.; MA, W. Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China. **Science of the Total Environment**, v. 647, p. 1433–1443, 2019.

CHEN, K.; WANG, J.; YU, B.; WU, H.; ZHANG, J. Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125071, 2021.

CHRISTENSEN, T. H.; DAMGAARD, A.; LEVIS, J.; ZHAO, Y.; BJÖRKLUND, A.; ARENA, U.; BARLAZ, M. A.; STAROSTINA, V.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. F.; BISINELLA, V. Application of LCA modelling in integrated waste management. **Waste Management**, v. 118, p. 313–322, 2020.

COCHRAN, K.; TOWNSEND, T.; REINHART, D.; HECK, H. Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida, US. **Waste Management**, v. 27, n. 7, p. 921–931, 2007.

COELHO, Y. C. D. M.; LUCAS, F. C. A.; SARMENTO, P. S. de M. Environmental perception and mining of aggregates: The view of the urban-rural population of Ourém, Pará, Brazil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 53, p. 38–60, 2020.

COINFRA/CBIC. **Construção é responsável por mais de 50% dos investimentos no país**. Disponível em: <<https://cbic.org.br/infraestrutura/2019/02/20/construcao-e-responsavel-por-mais-de-50-dos-investimentos-no-pais-4/>>. Acesso em: 15 abril de 2021.

COINFRA/CBIC. **Brazil's construction sector growth to slow in 2022**. Disponível em: <<https://cbic.org.br/veja-a-repercussao-do-estudo-construcao-civil-desempenho-2021-e-cenario-para-2022/>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2022.

COLANGELO, F.; PETRILLO, A.; CIOFFI, R.; BORRELLI, C.; FORCINA, A. Life cycle assessment of recycled concretes: A case study in southern Italy. **Science of the Total Environment**, v. 615, p. 1506–1517, 2018.

COLANGELO, F.; PETRILLO, A.; FARINA, I. Comparative environmental evaluation of recycled aggregates from construction and demolition wastes in Italy. **Science of The Total Environment**, v. 798, p. 149250, 1 dez. 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Construção sustentável: a mudança em curso**. Brasília: CNI, 2017.

CONG, L.; GUO, G.; YU, M.; YANG, F.; TAN, L. The energy consumption and emission of polyurethane pavement construction based on life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120395, 2020.

COPETTI, M. M. **Estudo de viabilidade de concreto estrutural com areia de descarte de fundição e adições minerais: propriedades mecânicas e análise de ciclo de vida**. Santa Maria. 2019. 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

COSTA, Ronaldo Silvestre da. **Quantificação das Emissões de Gases de Efeito Estufa para Veículos de Coleta de Resíduos Domiciliares Abastecidos com GNV e Diesel-B5 Utilizando Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. Porto Alegre, RS. 2016. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Do Sul.

COSTA, E. B. da; NOBRE, T. R. S.; GUERREIRO, A. Q.; MANCIO, M.; KIRCHHEIM, A. P. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 75–86, 2013.

COSTA, F. N.; RIBEIRO, D. V. Reduction in CO₂ emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123302, 2020.

CRENNA, E.; SECCHI, M.; BENINI, L.; SALA, S. Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 10, p. 1851–1877, 2019.

CUENCA-MOYANO, G. M.; MARTÍN-MORALES, M.; BONOLI, A.; VALVERDE-PALACIOS, I. Environmental assessment of masonry mortars made with natural and recycled aggregates. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 191-210, 2018.

CUNHA, I. B. da. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. Porto Alegre. 2016. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

DABHADE, A. N.; CHAUDARI, S. R.; GAJBHAYE, A. R. Effect of Flyash on Recycle Coarse Aggregate Concrete. **International Journal of Civil Engineering Research**, v. 5, n. 1, p. 35–42, 2014.

DAWOOD, A. O.; AL-KHAZRAJI, H.; FALIH, R. Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v.14, p. e00482, 2021.

DE SCHEPPER, M.; HEEDE, P. Van den; DRIESSCHE, I. Van; DE BELIE, N. Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. **Materials**, v. 7, p. 6010–6027, 2014.

DI MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ACKER, K. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making q. **Waste Management and Research**, v. 75, p. 3–21, 2018.

DI MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ACKER, K. Use of LCA and LCC to help decision-making between downcycling versus recycling of construction and demolition waste. **Advances in Construction and Demolition Waste Recycling**, p. 537–558, 2020.

DING, A.; ZHANG, R.; NGO, H. H.; HE, X.; MA, J.; NAN, J.; LI, G. Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review. **Science of the Total Environment**, v. 769, p. 144451, 2021.

DING, T.; XIAO, J. Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai. **Waste Management**, v. 34, p. 2327–2334, 2014.

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.; THOMAS NG, S.; KWAN, A. H.; WU, S. K. Substituting local data for overseas life cycle inventories e a case study of concrete products in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 414–422, 2015.

EC-JCR. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. EUR 24378 EM. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/international-reference-life-cycle-data-system-ilcd-handbook-general-guide-life-cycle>>. Acesso em: 15 de abril 2021.

ECHEVARRIA, M. J. M.; ALONSO, M. L.; GARACH, L.; ALEGRE, J.; POON, C. S.; AGRELA, F.; CABRERA, M. Crushing treatment on recycled aggregates to improve their mechanical behaviour for use in unbound road layers. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120517, 2020.

ESTANQUEIRO, B.; SILVESTRE, J. DINIS; BRITO, J.; PINHEIRO, M. D. Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. **European Journal Environmental Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 429–449, 2016.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 397–401, 2007.

FALESCHINI, F.; ZANINI, M. A.; PELLEGRINO, C.; PASINATO, S. Sustainable Management and Supply of Natural and Recycled Aggregates in a Medium-Size Integrated Plant. **Waste Management**, v. 49, p. 146–155, 2016.

FARINA, I.; COLANGELO, F.; PETRILLO, A.; FERRARO, A.; MOCCIA, I.; CIOFFI, R. LCA of concrete with construction and demolition waste. **Advances in Construction and Demolition Waste Recycling**, p. 501–513, 2020.

FATHALIZADEH, A.; HOSSEINI, M. R.; SILVIUS, A. J. G.; RAHIMIAN, A.; MARTEK, I.; EDWARDS, D. J. Barriers impeding sustainable project management: A Social Network Analysis of the Iranian construction sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 318, p. 128405, 2021.

FATHOLLAHI, A.; COUPE, S. J. Life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of road drainage systems for sustainability evaluation: Quantifying the contribution of different life cycle phases. **Science of the Total Environment**, v. 776, p. 145937, 2021.

FEIZ, R.; AMMENBERG, J.; BAAS, L.; EKLUND, M.; HELGSTRAND, A.; MARSHALL, R. Improving the CO₂ 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.

FERDOUS, W.; MANALO, A.; SIDDIQUE, R.; MENDIS, P.; ZHUGE, Y.; WONG, H. S.; LOKUGE, W.; ARAVINTHAN, T.; SCHUBEL, P. Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction-A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. **Resources, Conservation & Recycling journal**, v. 173, p. 105745, 2021.

FERNANDO, S.; GUNASEKARA, C.; LAW, D. W.; NASVI, M. C. M.; SETUNGE, S.; DISSANAYAKE, R. Life cycle assessment and cost analysis of fly ash–rice husk ash blended alkali-activated concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113140, 2021.

FERRUFINO, G. L. A. A. **Análise de propostas se sequestro mineral de carbono para usinas termolétricas no Brasil**. Guaratinguetá. 2012. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista, Brasil.

FERRO, F. S. **Painéis de partículas orientadas (OSB) com insumos alternativos: viabilidade técnica e proposta de melhoria de desempenho ambiental**. 2017. 178 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FILHO, O. C.; JUNIOR, N. L. S.; LUEDEMANN, G. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2016. 60 p.

FRIEDLER, E.; HADARI, M. Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings. **Desalination**, v. 190, p. 221–234, 2006.

GAUTAM, L.; JAIN, J. K.; KALLA, P.; DANISH, M. Sustainable utilization of granite waste in the production of green construction products: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 4196–4203, 2021.

GE, Z.; LI, H.; HAN, Z.; ZHANG, Q. Properties of cold mix asphalt mixtures with reclaimed granular aggregate from crushed PCC pavement. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 404–408, 2015.

GEHLOT, M.; SHRIVASTAVA, S. S. construction P. A. perspective view of I. construction industry professionals. Sustainable construction Practices: A perspective view of Indian construction industry professionals. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

GEHRKE, Daniele Büttendörfer Borba. **Avaliação do ciclo de vida de concreto produzido com substituição parcial do cimento Portland por resíduos cerâmicos**

da construção civil. Blumenau. 2021 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Regional de Blumenau, Brasil.

GENIN, C.; FRASSON, C. M. R. **O saldo da COP26: o que a Conferência do Clima significou para o Brasil e o mundo.** Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/clima/o-saldo-da-cop26-o-que-conferencia-do-clima-significou-para-o-brasil-e-o-mundo>>. Acesso em: 12 de abril de 2022.

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.

GERMAIN, M. Limits to growth and structural change. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 55, p. 204–221, 2020.

GHAFFAR, S. H.; BURMAN, M.; BRAIMAH, N. Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118710, 2020.

GHANBARI, M.; ABBASI, A. M.; RAVANSHADNIA, M. Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO₂ emissions. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, p. 810–822, 2018.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 3^a ed. São Paulo: Atlas, 1996

GIROTTO, S. B. F. T. **Avaliação de modelos de caracterização de AICV para a categoria SMOG fotoquímico considerando o contexto brasileiro.** 2018. 128 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Centro de Ciências Agroveterinária, Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil.

GISI, S. De; CASELLA, P.; NOTARNICOLA, M.; FARINA, R. Grey water in buildings: a mini-review of guidelines, technologies and case studies. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 33, p. 35–53, 2015.

GOEDKOOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A. D.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint**

level. Ruimte em Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening em Milieubeheer. Report I: Characterisation, first edition (version 1.08), 2013, 126 p.

GOLIĆ, K.; KOSORIĆ, V.; FURUNDŽIĆ, A. K. General model of solar water heating system integration in residential building refurbishment—Potential energy savings and environmental impact. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1533–1544, 2011.

GRABASCK, J. R. **Aspectos e impactos ambientais decorrentes da extração de agregado natural e produção de agregado reciclado: estudo de caso no RS.** São Leopoldo, 2016. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

GUO, Z.; TU, A.; CHEN, C.; LEHMAN, D. E. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 136–149, 2018.

HAFEZ, H.; KURDA, R.; CHEUNG, W. M.; NAGARATNAM, B. A systematic review of the discrepancies in life cycle assessments of green concrete. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, p. 4803, 2019.

HASIK, V.; ANDERSON, N.; COLLINGE, W.; THIEL, C.; KHANNA, V.; WIRICK, J.; PIACENTINI, R.; LANDIS, A.; BILEC, M. Evaluating the Life Cycle Environmental Benefits and Trade-Offs of Water Reuse Systems for Net-Zero Buildings. **Environmental science & technology**, v. 51, p. 10, 2016.

HE, Z.; SHEN, A.; LYU, Z.; LI, Y.; WU, H.; WANG, W. Effect of wollastonite microfibers as cement replacement on the properties of cementitious composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 119920, 2020.

HEEDE, P. Van Den; BELIE, N. De. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement & Concrete Composites journal**, v. 34, p. 431–442, 2012.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J.; HUPPES, G.; LANKREIJER, R. M.; HAES, H. A.; WEGENER SLEESWIJK, A.; ANSEMS, A. M. M.; EGGELS, P. G.; VAN DUIN, R.; GOEDE, H. P. Environmental Life Cycle Assessment of Products: Guide and

Backgrounds (Part 1). Centre of environmental Science, Leiden, Netherlands.

HEINRICHS, H. Strengthening sensory sustainability science-theoretical and methodological considerations. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, p. 12, 2019.

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

HÉLIAS, A.; ESNOUF, A.; FINKBEINER, M. Consistent normalization approach for Life Cycle Assessment based on inventory databases. **Science of The Total Environment**, v. 703, p. 134583, 2020.

HOANG, N. H.; ISHIGAKI, T.; KUBOTA, R.; TONG, T. K.; NGUYEN, T. T.; NGUYEN, H. G.; YAMADA, M.; KAWAMOTO, K. Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam. **Waste Management**, v. 117, p. 32–41, 2020.

HONG, T.; JI, C.; JANG, M.; PARK, H. S. Conversion Method for Obtaining CO2 Emission Data from the Life Cycle Inventory Database of Foreign Countries. **Journal of Management in Engineering**, v. 31, n. 4, p. 04014059, 2015.

HONMA, S.; HU, J. L. Cost efficiency of recycling and waste disposal in Japan. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 125274, 2021.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; LO, I. M. C.; CHENG, J. C. P. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 109, p. 67–77, 2016.

HOSSINEY, N.; SEPURI, H. K.; MOHAN, M. K.; ARJUN, H. R.; GOVINDARAJU, S.; CHYNE, J. Alkali-activated concrete paver blocks made with recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2020.

HUANG, B.; GAO, X.; XU, X.; SONG, J.; GENG, Y.; SARKIS, J.; FISHMAN, T.; KUA, H.; NAKATANI, J. A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. **One Earth**, v. 3, p. 564–573, 2020.

HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y.; BLEISCHWITZ, R.; REN, J. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36–44, 2018.

HUANG, L.; KRIGSVOLL, G.; JOHANSEN, F.; LIU, Y.; ZHANG, X. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1906–1916, 2018.

HUANG, Q.; ZHU, X.; XIONG, G.; WANG, C.; LIU, D.; ZHAO, L. Recycling of crushed waste clay brick as aggregates in cement mortars: An approach from macro- and micro-scale investigation. **Construction and Building Materials**, v. 274, p. 122068, 2021.

HUGHES, B. R.; CHAUDHRY, H. N.; GHANI, S. A. A review of sustainable cooling technologies in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3112–3120, 2011.

HUMMELS, H.; ARGYROU, A. Planetary demands: Redefining sustainable development and sustainable entrepreneurship. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123804, 2021.

INCE, C.; HAMZA, A.; DEROGAR, S.; BALL, R. J. Utilisation of waste marble dust for improved durability and cost efficiency of pozzolanic concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122213, 2020.

INGRAO, C.; LO GIUDICE, A.; MBOHWA, C.; CLASADONTE, M. T. Life cycle inventory analysis of a precast reinforced concrete shed for goods storage. **Journal of Cleaner Production**, v. 79, p. 152–167, 2014.

INGRAO, C.; LO GIUDICE, A.; TRICASE, C.; MBOHWA, C.; RANA, R. The use of basalt aggregates in the production of concrete for the prefabrication industry: Environmental impact assessment, interpretation and improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 75, p. 195–204, 2014.

INGRAO, C.; SELVAGGI, R.; VALENTI, F.; MATARAZZO, A.; PECORINO, B.; ARCIDIACONO, C. Life cycle assessment of expanded clay granulate production

using different fuels. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 398–409, 2019.

INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION – CIB United Nations Environment Programme International Environmental Technology Centre UNEP-IETC Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries: A discussion document Boutek Report No Bou/E0204, Pretória, CIB/UNEP-IETC. 2002.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes**. Lyon, France: IARC, 2014. (IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk to humans, v. 105).

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA. **Diretrizes para a vigilância do câncer relacionado ao trabalho**. Rio de Janeiro: INCA; 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA. **Ambiente, trabalho e câncer: aspectos epidemiológicos, toxicológicos e regulatórios** / Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. – Rio de Janeiro: INCA, 2021.

ISLAM, Md Jahidul., SHAHJALAL, Md. Effect of polypropylene plastic on concrete properties as a partial replacement of stone and brick aggregate **Case Studies in Construction Materials**, v.15, p. e00627, 2021.

JAIN, A.; GUPTA, R.; CHAUDHARY, S. Sustainable development of self-compacting concrete by using granite waste and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120516, 2020.

JESUS, S.; PEDERNEIRAS, C. M.; FARINHA, C. B.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Reduction of the cement content by incorporation of fine recycled aggregates from construction and demolition waste in rendering mortars. **Infrastructures**, v. 6, 2021.

JIANG, C.; XIONG, L.; WANG, D.; LIU, P.; GUO, S.; XU, C. Y. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 326–338, 2015.

JIN, R.; CHEN, Q. Investigation of Concrete Recycling in the U.S. Construction Industry. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 894–901, 2015.

JUNIOR, A. C. de A. G. **Diretrizes com base em avaliação do ciclo de vida para redução de emissão de dióxido de carbono em revestimento de argamassa**. Goiânia. 2013. 124 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Brasil.

KAPPEL, A.; OTTOSEN, L. M.; KIRKELUND, G. M. Colour, compressive strength and workability of mortars with an iron rich sewage sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 1199–1205, 2017.

KITTIPONGVISES, S. Assessment of environmental impacts of limestone quarrying operations in Thailand. **Environmental and Climate Technologies**, v. 20, n. 1, p. 67–83, 2017.

KLEPA, R. B.; MEDEIROS, M. F.; FRANCO, M. A. C.; TAMBERG, E. T.; FARIAS, T. M. de B.; PASCHOALIN FILHO, J. A.; BERSSANETI, F. T.; SANTANA, J. C. C. Reuse of construction waste to produce thermoluminescent sensor for use in highway traffic control. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 250–258, 2019.

KLEIJER, A. L.; LASVAUX, S.; CITHERLET, S. VIVIANI, M. Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 210-218, 2017.

KNOERI, C.; SANYÉ-MENGUAL, E.; ALTHAUS, H. J. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. v.18, p. 909–918, 2013.

KONG, L.; MA, B. Evaluation of environmental impact of construction waste disposal based on fuzzy set analysis. **Environmental Technology and Innovation**, v. 19, p. 100877, 2020.

KOWALKOWSKI, C.; GEBAUER, H.; OLIVA, R. Service growth in product firms: Past, present, and future. **Industrial Marketing Management**, v. 60, p. 82–88, 2017.

KUCUKVAR, M.; EGILMEZ, G.; TATARI, O. Life cycle assessment and optimization-based decision analysis of construction waste recycling for a LEED-certified university building. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, p. 1–13, 2016.

KUMAR, S.; MEHRA, P.; GUPTA, R.; JOSEPH, M.; CSETENYI, L. Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 906–909, 2016.

KUHN, C., BRUM, E.M., BERTICELLI, R., PANDOLFO, A., PASQUALI, P.B. Análise de Viabilidade Econômica de uma Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. v. 6 . Ed. 2. p. 478-494. 2017.

KURAD, R.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J.; AHMED, H. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, 2017.

KURDA, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 139, p. 407–417, 2018.

KURIYAMA, A.; ABE, N. Ex-post assessment of the Kyoto Protocol – quantification of CO₂ mitigation impact in both Annex B and non-Annex B countries-. **Applied Energy**, v. 220, p. 286–295, 2018.

LAGE, I. M.; ABELLA, F. M.; HERRERO, C. V.; ORDÓÑEZ, J. L. P. Estimation of the annual production and composition of C&D Debris in Galicia (Spain). **Waste Management**, v. 30, n. 4, p. 636–645, 2010.

LAMBERTI, L. A. **Pilar com diferentes traços de concreto frente a carbonatação : do berço ao túmulo**. Santa Maria. 2015. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

LEMOUGNA, P. N.; MACKENZIE, K. J. D.; MELO, U. F. C. Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. **Ceramics International**, v. 37, p. 3011–3018, 2011.

LEUNG, H. Y.; KIM, J.; NADEEM, A.; JAGANATHAN, J.; ANWAR, M. P. Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 369–375, 2016.

LI, C. Z.; CHEN, Z.; XUE, F.; KONG, X. T. R.; XIAO, B.; LAI, X.; ZHAO, Y. A blockchain- and IoT-based smart product-service system for the sustainability of prefabricated housing construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125391, 2021.

LI, X.; ZHU, Y.; ZHANG, Z. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. **Building and Environment**, v. 45, p. 766–775, 2010.

LI, J.; XIAO, F.; ZHANG, L.; AMIRKHANIAN, S. N. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. **Journal of Cleaner Production**, Volume 233, p. 1182-1206, 2019.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das conseqüências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. São Paulo. 2010. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, Brasil.

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

LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; GACHET-BARBOSA, L. A. Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 166–181, 2012.

LLATAS, C.; BIZCOCHO, N.; VERDAGUER, B.; MONTES, M. V.; QUIÑONES, R. An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. **Waste Management**, v. 126, p. 608–622, 2021.

LOTFI, S.; EGGIMANN, M.; WAGNER, E.; MRÓZ, R.; DEJA, J. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 243–256, 2015.

LOTFY, A.; AL-FAYEZ, M. Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 61, p. 36–43, 2015.

LOVATO, P. S.; POSSAN, E.; MOLIN, D. C. C. D.; MASUERO, A. B.; RIBEIRO, J. L. D. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 437-447, 2012.

LUSHNIKOVA, N.; DVORKIN, L. Sustainability of gypsum products as a construction material. In: **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**. [s.l.: s.n.].p. 643–681.

LUZ, L. M. DA. **Integração da avaliação do ciclo de vida ao processo de desenvolvimento de produto: uma proposta metodológica**. Ponta Grossa. 2017. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, Brasil.

MAGALHÃES, M. R. DE. **Aplicação integrada de BIM e ACV como ferramenta para prevenção de resíduo sólido de construção civil**. Campinas. 2018. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

MAHMOUDKELAYE, S.; TAGHIZADE AZARI, K.; POURVAZIRI, M.; ASADIAN, E. Sustainable material selection for building enclosure through ANP method. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00200, 2018.

MANJUNATHA, M.; PREETHI, S.; MALINGARAYA; MOUNIKA, H. G.; NIVEDITHA, K. N.; RAVI. Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 3637–3644, 2021.

MANJUNATHA, M.; RESHMA, T. V.; BALAJI, K. V. G. D.; BHARATH, A.; TANGADAGI, R. B. The sustainable use of waste copper slag in concrete: An experimental research. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 3645–3653, 2021.

MARCEAU, M. L.; NISBET, M. A.; VANGEEM, M. G. **Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete**. Portland Cement Association, 2007.

MARINKOVIĆ, S. On the selection of the functional unit in LCA of structural concrete. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, 2017.

MARINKOVIĆ, S. B.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates. **Eco-efficient Construction and Building Materials**, p. 239–266, 2013.

MARINKOVIĆ, S.; DRAGAŠ, J.; IGNJATOVIĆ, I.; TOŠIĆ, N. Environmental assessment of green concretes for structural use. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 633–649, 2017.

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

MARTINEZ-SANCHEZ, V., KROMANN, M. A., ASTRUP, T. F. Life cycle costing of waste management systems: Overview, calculation principles and case studies. **Waste Management**. v. 36, p. 343-355, 2015.

MARTINS, W. A. **Avaliação do ciclo de vida do programa de coleta seletiva do município de João Pessoa-PB, Brasil**. João Pessoa. 2017. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 2017.

MATIAS, A. N. **Resíduos de construção e demolição à luz da política nacional de resíduos sólidos**. Foz do Iguaçu. 2020. 205 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Brasil.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. The Environmental Impact of Mining in the State of São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, p. 209–220, 2010.

MEDINA, C.; ZHU, W.; HOWIND, T.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRÍAS, M. Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 216–225, 2014.

MELE, A.; PAGLIALUNGA, E.; SFORNA, G. Climate cooperation from Kyoto to Paris: What can be learnt from the CDM experience?. **Socio-Economic Planning Sciences**, p. 100942, 2020.

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**. São Carlos. 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, 2013.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 8–15, 2018.

MERLO, A., LAVAGNA, L., Suarez-Riera, D., PAVESE, Matteo. Mechanical properties of mortar containing waste plastic (PVC) as aggregate partial replacement. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00467, 2020.

MILLER, K. B. **Modelo parametrizado de ACV: aplicação em sistemas construtivos com estudo de caso em vedações verticais**. Brasília. 2015. 273 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília Faculdade, Brasil.

MILNER, H. R. Sustainability of engineered wood products in construction. **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**. 2009. p. 184–212.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim do Setor Mineral 2020 (Julho). In: SECRETARIA DE GEOLOGIA, M. E T. M. (Ed.). **Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. 4. ed. Brasília: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2020. p. 36.

MITHRARATNE, N.; VALE, B. Life cycle analysis model for New Zealand houses. **Building and Environment**, v. 39, n. 4, p. 483–492, 2004.

MORAGA, G. L. **Avaliação do ciclo de vida em unidade habitacional unifamiliar do programa minha casa minha vida**. Porto Alegre. 2017. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

MOREAU, V.; BAGE, G.; MARCOTTE, D.; SAMSON, R. 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.

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

NASIER, S. Utilization of recycled form of concrete, E-wastes, glass, quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

NEBEL, B.; ALCORN, A.; WITTSTOCK, B. Life Cycle Assessment : Adopting and adapting overseas LCA data and methodologies for building materials in New Zealand. **Scion Next generation biomaterials**, p. 56, 2009.

NEW ZEALAND GREEN BUILDING COUNCIL. Green Star Technical Manual v3.1. **NZGB**, p. 542, 2016.

NITHYA, M.; RAMASAMY, M. Sustainability in construction industry through zero waste technology in India. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 849–851, 2021.

NWAKAIRE, C. M.; YAP, S. P.; ONN, C. C.; YUEN, C. W.; IBRAHIM, H. A. Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117444, 2020.

OCHARÁN, J. S.; LIMA, F. M. S.; LOVÓN, G. C. Avaliação comparativa ambiental da produção de agregados naturais e reciclados para a construção civil. In: XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minerios e Metalurgia Extrativa, **Anais...**2019.

OLAWUMI, T. O.; CHAN, D. W. M. A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 231–250, 2018.

OLIVEIRA, M. E. D. de; SALES, R. J. de M.; OLIVEIRA, L. A. S. de; CABRAL, A. E. B. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 219–224, 2011.

OLOFINNADE, Oluwarotimi., MORAWO, Ayoyinka., OKEDAIRO, Oluwatomisin., KIM, Boksun. Solid waste management in developing countries: Reusing of steel slag aggregate in eco-friendly interlocking concrete paving blocks production. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00532, 2021.

ÖZALP, F.; YILMAZ, H. D.; KARA, M.; KAYA, Ö.; ŞAHİN, A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 17–23, 2016.

PACHECO, J.; DE BRITO, J.; CHASTRE, C.; EVANGELISTA, L. 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.

PACHECO, R.; ORDÓÑEZ, J.; MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3559–3573, 2012.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. São Leopoldo, 2013. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. de; COSTA, E. B. da; KIRCHHEIM, A. P. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, p. 7–20, 2014.

PASSUELLO, A.; BARRETO, M. F. F.; TIMM, J. F. G.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, J. R. Life cycle costs and impacts of massive slabs with varying concrete cover. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 5, p. 100256, 2021.

PATIL, A. R.; SATHE, S.B. Feasibility of sustainable construction materials for concrete paving blocks: A review on waste foundry sand and other materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 1552-1561, 2021.

PAULA, R. R. de. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD)**. Rio de Janeiro. 2016. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, v. 16, n. 5, p. 281–289, 2002.

POULIKAKOS, L. D.; PAPADASKALOPOULOU, C.; HOFKO, B.; GSCHÖSSER, F.; CANNONE FALCHETTO, A.; BUENO, M.; ARRAIGADA, M.; SOUSA, J.; RUIZ, R.; PETIT, C.; LOIZIDOU, M.; PARTL, M. N. Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 32–44, 2017.

PRADHAN, S.; TIWARI, B. R.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Comparative LCA of recycled and natural aggregate concrete using Particle Packing Method and conventional method of design mix. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 679–691, 2019.

QUAGLIO, R. S. **Resíduos da construção e demolição (RCD): estudo dos impactos ambientais provocados pelo descarte inadequado no município de Presidente Bernardes - SP**. Presidente Prudente. 2017. 120 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional). Univerisidade do Oeste Paulista, Brasil.

RAHMAN, M. A.; IMTEAZ, M. A.; ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M. Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 183–194, 2015.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, 2010.

RASHID, A. F. A.; YUSOFF, S. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 244–248, 2015.

REICHERT, B.; SOUZA, A. M. Interrelationship simulations among Brazilian electric matrix sources. **Electric Power Systems Research**, v.193, 2021.

ROCAMORA, A. M.; GUZMÁN, J. S.; MARRERO, M. LCA databases focused on construction materials: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 565–573, 2016.

ROCHA, D. P. B. DA. **Avaliação do ciclo de vida de agregados leves artificiais produzidos com resíduo industrial e argila vermelha local (Nordeste/Brasil)**. Natal. 2020. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

RODRÍGUEZ, G.; BOSQUE, I. F. S. del; ASENSIO, E.; ROJAS, M. I. S. de; MEDINA, C. Construction and demolition waste applications and maximum daily output in Spanish recycling plants. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 4, p. 423–432, 2020.

ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 634–642, 2017.

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

RUIZ, L. A. L.; RAMÓN, X. R.; DOMINGO, S. G. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119238, 2020.

SABERIAN, M.; LI, J.; BOROJENI, M.; LAW, D.; LI, C. Q. Application of demolition wastes mixed with crushed glass and crumb rubber in pavement base/subbase. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, p. 104722, 2020.

SABERIAN, Mohammad.; ZHANG, Jingxuan.; GAJANAYAKE, Akvan.; LI, Jie.; ZHANG, Guomin.; BOROJENI, Mahdi. Life cycle assessment (LCA) of concrete containing waste materials: comparative studies. **Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management**, p. 637-659, 2022.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3617–3631, 2011.

SALVI, C. R. **Estudo da viabilidade da utilização de agregados reciclados provenientes de rcd em estradas rurais e florestais**. Porto. 2020. 151 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil). Universidade do Porto, Portugal.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, p. 35–49, 2016.

SANTOS, R. P.; TUBINO, R. Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of degraded soils by mining in Brazil. **Resoucers, Conservation & Recycling Advance**. v. 12, p. 20060, 2021.

SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105792, 2019.

SECHER, A. Q.; COLLIN, C.; LINNET, A. Construction Product Declarations and Sustainable Development Goals for Small and Medium Construction Enterprises. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 54–58, 2018.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: Ferramenta gerencial para tomada de decisão. **InterfacEHS - Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, p. 1–23, 2006.

SETO, K.; PANESAR, D.; CHURCHILL, C. Criteria for the evaluation of life cycle assessment software packages and life cycle inventory data with application to concrete. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, 2017.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4^a. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SILVA, I. N. da; MAUÉS, L. M. F. Inventory of sand and pebble production for use in hot mix asphalt: A case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126271, 2021.

SILVA, S. R. DA. **Contribuição ao estudo dos concretos compostos com agregados graúdos de construção e demolição e cinza volante, em diferentes teores de substituição.** Porto Alegre. 2017. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

SILVA, S. R. da; ANDRADE, J. J. de O. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 704–715, 2017.

SILVA, J. A. P. **A mineração de brita na região metropolitana do Rio de Janeiro.** Ouro Preto. 2005. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral.). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

SILVA, A. O. **Avaliação de ciclo de vida de concretos com substituição parcial de cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz.** 2015. 1311 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

SONG, J.; YANG, Z.; XIA, J.; CHENG, D. The impact of mining-related human activities on runoff in northern Shaanxi, China. **Journal of Hydrology**, v. 598, p. 126235, 2021.

SOUZA, J. M. de; LUKIANTCHUKI, J. A. Resíduos de construção civil: geração, gestão e uso para fins de pavimentação. (XI EPCC, Ed.) In: XI Econtro Nacional de Produção Científica, Maringá. **Anais...** Maringá: 2019.

SOUZA, F. S.; MENDES, J. C.; MORAIS, L. J. B.; SILVA, J. S.; PEIXOTO, R. A. F. Mapping and recycling proposal for the construction and demolition waste generated in the Brazilian Amazon. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 176, 2022.

SJUNNESSON, J. **Life Cycle Assessment of Concrete.** 2005. 61 p. Master Thesis (Environmental and Energy Systems Studies, Department of Technology and Society) – Lund University, Lund, Sweden, 2005.

TABATA, Tomohiro., ONISHI, Akio., SAEKI, Takashi., TSAI, Peii. Earthquake disaster waste management reviews: Prediction, treatment, recycling, and prevention, **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 36, p. 101119, 2019.

TAKANO, A.; WINTER, S.; HUGHES, M.; LINKOSALMI, L. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. **Building and Environment**, v. 79, p. 20–30, 2014.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

TAM, V. W. Y.; LU, K.; JIANG, X.; YU, J.; SKITMORE, M. Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 125438. 2021 .

TAM, V. W. Y.; TAJI, I.; GHORBANI, S.; DE BRITO, J.; SHARIFI, S.; DAVOODI, A.; TAVAKKOLIZADEH, M. Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 837–846, 2019.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. A review on the viable technology for construction waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 47, n. 3, p. 209–221, 2006.

TAQUES, F. H.; SOUZA, H. P. B. de; ALENCAR, D. A. The 2007-08 Financial Crisis from a Marxist View. **Modern Economy**, v. 08, n. 09, p. 1069–1081, 2017.

TEKLAY, A.; YIN, C.; ROSEND AHL, L. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO2 footprint from cement industry. **Applied Energy**, v. 162, p. 1218–1224, 2016.

THWE, E.; KHATIWADA, D.; GASPARATOS, A. Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, p. 100007, 2021.

TIEMI, C.; COLODEL, M.; IBP, F. Systematic approach for the transferability of life cycle inventory data between countries. In: 8th International Conference on EcoBalance, Tokyo. **Anais...** Tokyo: 2008.

TONON, D. C. D. S. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) dos concretos compostos com agregados graúdos de construção e demolição em diferentes teores de substituição**. Porto Alegre. 2019. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

TOŠIĆ, N.; MARINKOVIĆ, S.; DAŠIĆ, T.; STANIĆ, M. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, n. 1, p. 766–776, 2015.

TRINDADE, J. C. **A influência do teor de agregados reciclados provenientes de concretos simples com diferentes resistências no comportamento anti-cisalhamento**. Campos dos Goytacazes. 2017. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasil.

TSENG, M.-L.; LIN, S.; CHEN, C.-C.; SARMIENTO, L. S. C.; TAN, C. L. A causal sustainable product-service system using hierarchical structure with linguistic preferences in the Ecuadorian construction industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 477–487, 2019.

UDOMSAP, A. D.; HALLINGER, P. A bibliometric review of research on sustainable construction, 1994–2018. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120073, 2020.

UGAYA, C. M. L.; NETO, J. A. de A.; FIGUEIREDO, M. C. B. de. **Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro**. IBICT: 2019, 161 p.

UN ENVIRONMENT, KAREN L. SCRIVENERA, VANDERLEY M. JOHNB, E. M. G. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Composites and Concrete Research**, p. 2–26, 2018.

UTAMA, A.; GHEEWALA, S. H. Indonesian residential high rise buildings: A life cycle energy assessment. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 4, p. 1263–1268, 2009.

VALVERDE, F. M. O novo normal na indústria de agregados. **Associação nacional das entidades de produtores de agregados para construção - ANEPAC**, 2020.

VEDRONI, W. J.; CARVALHO, D. de. Case study: use of construction and demolition residues in road repair work in Piracicaba-SP. **HOLOS Environment**, v. 8, n. 2, p. 149–165, 2008.

VERDAGUER, B.; LLATAS, C.; MARTÍNEZ, A. Critical review of bim-based LCA method to buildings. **Energy and Buildings**, v. 136, p. 110–120, 2017.

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.

VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; ZULCÃO, R.; COELHO, F. Z. Consideration of strength and service life in cradle-to-gate life cycle assessment of self-compacting concrete in a maritime area: a study in the Brazilian context. **Environment, Development and Sustainability**, v. 20, n. 4, 2018.

VISINTIN, P.; XIE, T.; BENNETT, B. A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119243, 2020.

WAGIH, A. M.; EL-KARMOTY, H. Z.; EBID, M.; OKBA, S. H. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **HBRC Journal**, v. 9, p. 193–200, 2013.

WANG, C.; GENG, L.; CASALLAS, J. D. R. How and when higher climate change risk perception promotes less climate change inaction. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, p. 128952, 2021.

WANG, J.; WU, H.; TAM, V. W. Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 1004–1014, 2019.

WASKOW, R. P.; SANTOS, V. L. G.; KANNO, R.; TUBINO, R. M. C. Cost Assessment of the Brazilian Construction and Demolition Waste Recycling Plant: A Case Study of Porto Alegre. **Revista Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)**. 2019.

WEIL, M.; JESKE, U.; SCHEBEK, L. Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. **Waste Management**, v. 24, p. 197-206, 2006.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, p. 1–13, 2016.

WILENIUS, M. Society , consciousness and change — An inquiry into Pentti Malaska's futures thinking. **Futures**, v. 61, p. 58–67, 2014.

WASKOW, R. P. Avaliação técnica, ambiental e econômica do uso do jigge a ar na reciclagem do resíduo da construção e demolição (RCD) brasileiro. Porto Alegre. 2019. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

XIAO, J.; LI, W.; FAN, Y.; HUANG, X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 364–383, 2012.

YANG, S.; LIM, Y. Mechanical strength and drying shrinkage properties of RCA concretes produced from old railway concrete sleepers using by a modified EMV method. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 499–507, 2018.

YAZDANBAKHSH, A.; BANK, L. C.; BAEZ, T.; WERNICK, I. Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 6, p. 1163–1173, 2018.

YEHEYIS, M.; HEWAGE, K.; ALAM, M. S.; ESKICIOGLU, C.; SADIQ, R. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 15, p. 81–91, 2013.

YILMAZ, Y.; SEYIS, S. Mapping the scientific research of the life cycle assessment in the construction industry: A scientometric analysis. **Building and Environment**, v. 204, p. 108086, 2021.

YOONUS, H.; AL-GHAMDI, S. G. Environmental performance of building integrated grey water reuse systems based on Life-Cycle Assessment: A systematic and bibliographic analysis. **Science of The Total Environment**, v. 712, p. 136535, 2020.

YU, H.; ZHU, Z.; ZHANG, Z.; YU, J.; OESER, M.; WANG, D. Recycling waste packaging tape into bituminous mixtures towards enhanced mechanical properties and environmental benefits. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 22–31, 2019.

ZENG, Q.; LI, L.; LIU, J.; LU, T.; XU, J.; AL-MANSOUR, A.; WANG, J.; XIA, J. Microstructure and properties of concrete with ceramic wastes. **Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management**, p. 229-253, 2022.

ZHANG, L. W.; SOJOBI, A. O.; KODUR, V. K. R.; LIEW, K. M. Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117600, 2019.

ZHANG, Y.; LUO, W.; WANG, J.; WANG, Y.; XU, Y.; XIAO, J. A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 115–125, 2019.

ZHANG, R. QURESHI.; T. S.; PANESAR, D.K. Use of industrial waste in construction and a cost analysis. **Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management**, p. 615-635, 2022.

ZOMBINI, E. V. Educação Ambiental e Saneamento Básico para a Promoção da Saúde da Criança. p. 146, 2013.

ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANG, S. Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 175–182, 2014.

ANEXO

DADOS DE ENTRADA DO SIMAPRO – INVENTÁRIO PARA FABRICAÇÃO DE 1M³ DE CONCRETO COM 32 MPA

INSUMO	QUANTIDADE	UNIDADE
Ácido acético, sem água, no estado de solução a 98% {GLO}*	0,054	kg
Químico, orgânico {GLO}*	0,037798	kg
Mistura do concreto {GLO}*	4,57E-7	p
Diesel, queimado na máquina de construção {GLO}*	15,64272	MJ
Eletricidade, média tensão {BR}*	770,83	KWh
Óxido de etileno {ROW}*	0,216	kg
Álcool gorduroso {GLO}*	2,7	kg
Calor, distrital ou industrial, gás natural {GLO}*	3,697541	MJ
Calor, distrital ou industrial, gás natural {RoW} aquecimento*	6,934729	MJ
Óleo lubrificante {RoW}*	0,0119	kg
Aço de baixa liga, laminado a quente {GLO}*	0,0238	kg
Borracha sintética {GLO}*	0,00713	kg
CONREF00		
Cimento Portland V ARI (Tabela 4.7)	283,02	kg
Brita 19 mm (Tabela 4.7)	1.074,85	kg
Areia (Tabela 4.7)	929,04	kg
Água da torneira {GLO} (Tabela 4.7)	180,61	kg
CONARM25		
Cimento Portland V ARI (Tabela 4.7)	346,84	kg
Brita 19 mm (Tabela 4.7)	781,29	kg
Areia (Tabela 4.7)	827,87	kg

INSUMO	QUANTIDADE	UNIDADE
CONARM25		
Agregado reciclado (Tabela 4.7)	260,43	kg
Água da torneira {GLO} (Tabela 4.7)	182,89	kg
CONARM50		
Cimento Portland V ARI (Tabela 4.7)	427,59	kg
Brita 19 mm (Tabela 4.7)	504,72	kg
Areia (Tabela 4.7)	710,72	kg
Agregado reciclado (Tabela 4.7)	504,72	kg
Água da torneira {GLO} (Tabela 4.7)	187,12	kg
CONARM75		
Cimento Portland V ARI (Tabela 4.7)	534,55	kg
Brita 19 mm (Tabela 4.7)	244,36	kg
Areia (Tabela 4.7)	567,69	kg
Água da torneira {GLO} (Tabela 4.7)	194,23	kg
Agregado reciclado (Tabela 4.7)	733,09	kg
CONARM100		
Cimento Portland V ARI (Tabela 4.7)	547,26	kg
Areia (Tabela 4.7)	526,25	kg
Água da torneira {GLO} (Tabela 4.7)	192,05	kg
Agregado reciclado (Tabela 4.7)	951,05	kg
EMISSÕES PARA O AR		
Água*	0,006141	m ³
EMISSÕES PARA A ÁGUA		
Cloretos*	3,09E-9	kg
Cobre*	1,55E-8	kg
Ferro*	1,55E-8	kg
Óleos*	2,32E-7	kg
Sólidos em suspensão*	4,64E-7	kg

Fonte: Ecoinvent 3.6*



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
Site: www.pucrs.br