



Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Análise para implantação de um sistema de
reciclagem de Resíduos da Construção Civil
na Região Metropolitana de Belém**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Luciano Sousa Melo

2022

Luciano Sousa Melo

**Análise para implantação de um sistema de reciclagem de
Resíduos da Construção Civil na Região Metropolitana de Belém**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués.

Belém, 09 de setembro de 2022

Luciano Sousa Melo

Análise para implantação de um sistema de reciclagem de Resíduos da Construção Civil na Região Metropolitana de Belém

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Belém, 09 de setembro de 2022

Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Orientador
Universidade Federal do Pará

Banca Examinadora

Prof^a. Dr. Francisco Gaudêncio Mendonça Freires
Examinador Externo
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Prof^o. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Examinadora Interna
Universidade Federal do Pará

Coordenador do Programa
Prof^o. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC/ITEC/UFPA



ANÁLISE PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM

AUTOR:

LUCIANO SOUSA MELO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 09 / 09 / 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Mauricio Furtado Maués
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Francisco Gaudêncio Mendonça Freires
Membro Externo (UFBA)

Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luciano Sousa Melo

TÍTULO: Análise para implantação de um sistema de reciclagem de Resíduos da Construção Civil na Região Metropolitana de Belém.

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Luciano Sousa Melo

Rodovia Transcoqueiro, nº 279.

Coqueiro.

67.113-345 Ananindeua – PA – Brasil.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

M528a Melo, Luciano Sousa.
 Análise para implantação de um sistema de reciclagem de
 Resíduos da Construção Civil na Região Metropolitana de Belém /
 Luciano Sousa Melo. — 2022.
 94 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Civil, Belém, 2022.

 1. Resíduos da Construção Civil (RCC). 2. Avaliação do
 Ciclo de Vida (ACV). 3. Usinas de Reciclagem. I. Título.

CDD 624

Aos meus pais, Joseildo e Adriana, e a minha
esposa, Emelly, por terem me ajudado nessa longa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Não poderia realizar este trabalho sem agradecer a Deus, que por intermédio de Nossa Senhora das Graças, me permite realizar o sonho de concluir esta dissertação. Ele é fiel e cumpre a sua palavra: “Buscai primeiro o reino de Deus, e tudo mais vos será dado como acréscimo.” (Mt 6,33).

Agradeço à minha família, minha mãe Adriana, meu pai Joseildo, meu irmão Lucas, que foram o meu sustento durante todos esses anos, contribuidores diretos de grande parte da minha formação. Certeza que sem eles eu não teria chegado até aqui.

Agradeço à minha esposa Emelly, com quem eu passo a constituir uma nova família. Sua presença na minha vida, principalmente na reta final, foi crucial para que eu pudesse chegar até aqui. Enquanto eu dizia não dar conta, ela segurava na minha mão e me fazia acreditar que era possível. Com ela, a partir de agora, almejo coisas ainda melhores.

Agradeço ao professor Luiz Maurício, meu orientador, por toda a paciência e persistência que dispensa, não só a mim, mas a todos os seus orientandos. Me fez seguir um desafio muito grande, algo ainda pouco explorado no meio científico, pelo menos na nossa realidade, mas com seu auxílio, tudo foi se tornando menos trabalhoso.

Agradeço ao meu amigo Ronaldo, pela parceria desde a época de graduação e que se estendeu ao mestrado. Sem sua ajuda, também não seria possível realizar este sonho. Também agradeço às amigas de estudo, Karina e Poliana, que caminharam comigo nessa jornada de aprender ACV.

Por fim, agradeço a todos os professores e coordenadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pessoas que contribuíram direta e indiretamente na realização deste trabalho.

Muito obrigado!

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

(Albert Einstein)

RESUMO

Os resíduos da construção civil (RCC) são grandes contribuidores para a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), haja vista que representam cerca de 35% do total de resíduos sólidos gerados no mundo, sendo dispostos em locais inadequados e sem gestão eficaz. A reciclagem, nesse sentido, atua como uma das alternativas para essa problemática. Entretanto, os impactos ambientais decorrentes dessa atividade podem ser altos, a depender da configuração do sistema. A Região Metropolitana de Belém, sendo a segunda maior mancha urbana da Região Norte do Brasil, sofre com a gestão inadequada de seus resíduos de construção, uma vez que os mesmos são dispostos de forma inadequada, além de não existirem áreas de beneficiamento que possam mitigar tais problemas. Por isso, este trabalho propõe investigar os impactos ambientais envolvidos na operação futura de uma usina de reciclagem de RCC na Região Metropolitana de Belém, através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O estudo foi dividido em três fases, onde primeiramente foi realizada uma proposição para implantação da usina de reciclagem, seguido pela realização da ACV, que utilizou o Impact 2002+ como método de avaliação de impacto e, logo em seguida, realizada a análise dos resultados. A ACV permitiu identificar que os processos de movimentação do resíduo por retroescavadeira e transporte apresentam os maiores impactos ambientais, decorrentes do consumo de diesel por parte dos equipamentos. Além disso, as categorias efeitos respiratórios inorgânicos, energia não renovável e aquecimento global representam cerca de 89% do total de impactos ambientais calculados, indicando que a operação de usinas de reciclagem causa danos à saúde humana e ao ecossistema. Dessa forma, com base na literatura, foi proposta a melhor alternativa de gerenciamento de RCC para a Região Metropolitana de Belém, através do incentivo a triagem no canteiro de obras, para os grandes geradores, e da implementação de ecopontos espalhados pela cidade, para os pequenos geradores, diminuindo a carga ambiental causada pelos processos que mais causam impactos, segundo a ACV.

Palavras-chave: Resíduos da Construção Civil (RCC), Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Usinas de Reciclagem.

ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) is a major contributor to the generation of solid waste, given that it represents about 35% of the total solid waste generated in the world, being disposed of in inappropriate places and without effective management. Recycling, in this sense, acts as one of the alternatives for this problem. However, the environmental impacts resulting from this activity can be high, depending on the configuration of the system. Belém Metropolitan Region, being the second-largest urban area in the Brazil Northern Region, suffers from the inadequate management of its construction waste, since they are disposed of improperly, in addition to the lack of improvement areas that can mitigate such problems. Therefore, this work proposes to investigate the environmental impacts involved in the future operation of an CDW recycling plant in the Belém Metropolitan Region, through the Life Cycle Assessment (LCA). The study was divided into three phases, where first a proposal was made for the implementation of the recycling plant, followed by the realization of the LCA, which used the Impact 2002+ as an impact assessment method and, soon after, the analysis of the results was carried out. The LCA allowed us to identify that the waste handling processes by loader and transport have the greatest environmental impacts, resulting from the consumption of diesel by the equipment. In addition, the categories inorganic respiratory effects, non-renewable energy and global warming represent about 89% of the total calculated environmental impacts, indicating that the operation of recycling plants causes damage to human health and the ecosystem. In this way, based on the literature, the best alternative for managing CDW for Belém Metropolitan Region was proposed, by encouraging sorting at the construction site, for large generators, and by implementing drop-off sites spread throughout the city, for small generators, reducing the environmental burden caused by the processes that cause the most impacts, according to LCA.

Keywords: Construction and Demolition Waste (CDW), Life Cycle Assessment (LCA), Recycling Plants

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: disposição de resíduos sólidos em lixões	21
Figura 2.2: disposição de resíduos sólidos em aterros controlados	22
Figura 2.3: disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários	22
Figura 2.4: ilustração do funcionamento da logística reversa na cadeia de suprimentos	28
Figura 2.5: usina de planta fixa	30
Figura 2.6: usina de planta móvel.....	31
Figura 2.7: fluxograma de processos de uma usina de reciclagem de RCC.....	34
Figura 2.8: alimentador vibratório.....	35
Figura 2.9: britador de mandíbula, impacto e cônico (da esquerda para a direita)	36
Figura 2.10: peneira vibratória	36
Figura 2.11: transportador de correia	37
Figura 2.12: disposição de resíduo da construção sobre a calçada em um bairro de Belém	38
Figura 2.13: fluxograma do serviço de coleta de RCC em Belém.	38
Figura 2.14: etapas que envolvem uma Avaliação do Ciclo de Vida.....	41
Figura 2.15: representação da unidade funcional	43
Figura 2.16: elementos obrigatórios em uma AICV.....	45
Figura 3.1: delineamento da pesquisa	53
Figura 3.2: sistema do produto	56
Figura 4.1: área que compreende o atual aterro do Aurá.....	64
Figura 4.2: distância entre futura usina e Aterro Sanitário de Marituba	67
Figura 4.3: distância entre futura usina e recicladora privada.....	67
Figura 4.4: valores de impacto ambiental normalizados	71
Figura 4.5: emissões que contribuem para a categoria Efeitos respiratórios inorgânicos	72
Figura 4.6: matéria-prima consumida para a categoria energia não-renovável.....	73
Figura 4.7: emissões que contribuem para a categoria aquecimento global	73
Figura 4.8: configuração que melhor atende a gestão dos RCC em Belém, de acordo com o estudo de ACV.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: área necessária para a usina de reciclagem.....	54
Tabela 4.1: resultados da revisão sistemática.....	61
Tabela 4.2: equipamentos utilizados e potência	64
Tabela 4.3: estimativas populacionais para as cidades de Belém e Campinas.....	65
Tabela 4.4: quantidade de RCC que entra na usina para produção de agregado reciclado	65
Tabela 4.5: valores de entrada do processo de transporte de RCC para usina	66
Tabela 4.6: valores de entrada do processo de transporte de rejeitos para disposição final.....	66
Tabela 4.7: valores de entrada do processo de transporte de RCC classe B para reciclagem ..	67
Tabela 4.8: gasto energético para produção de 1 t de agregado reciclado	69
Tabela 4.9: contribuição (%) dos processos para os impactos totais de cada categoria.....	69
Tabela 4.10: contribuição do diesel nas categorias onde a movimentação por retroescavadeira causa os maiores impactos ambientais	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: normas que estabelecem diretrizes para a elaboração de uma ACV	40
Quadro 3.1: dados primários e secundários necessários para avaliação dos impactos.....	57
Quadro 3.2: matriz pedigree	58
Quadro 3.3: categorias de impacto do método Impact 2002+	60
Quadro 4.1: principais dados obtidos a partir da análise contribucional dos impactos.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Neste item são apresentadas as abreviaturas utilizadas nesta dissertação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados ao longo do texto desta pesquisa.

Símbolo	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação Do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduo da Construção Civil
RMB	Região Metropolitana de Belém
RSL	Revisão Sistemática da Literatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Contextualização, justificativa e problema de pesquisa.....	16
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	Estrutura do Trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	A gestão de resíduos sólidos urbanos	20
2.2	Resíduos da Construção Civil (RCC)	23
2.3	Usinas de Reciclagem de RCC.....	29
2.3.1	Definição e classificação	29
2.3.2	Critérios para implantação e operação de usinas de reciclagem.....	31
2.3.2.1	Condições de implantação de usinas de reciclagem de RCC	32
2.3.2.2	Condições de operação de usinas de reciclagem de RCC	32
2.3.3	Procedimentos e equipamentos utilizados em usinas de reciclagem de RCC	33
2.4	A gestão dos RCC na Região Metropolitana de Belém	37
2.5	Avaliação do Ciclo de Vida como instrumento para verificação de impactos ambientais	39
2.5.1	Definição.....	39
2.5.2	Etapas envolvidas na elaboração de um estudo de ACV.....	40
2.5.2.1	Definição do objetivo e escopo.....	41
2.5.2.2	Análise do Inventário do Ciclo de Vida.....	43
2.5.2.3	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)	44
2.5.2.4	Interpretação dos resultados	47
2.6	Avaliação do Ciclo de Vida no contexto dos Resíduos de Construção Civil	47
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	51

3.1	Características Gerais	51
3.2	Revisão Sistemática da Literatura (RSL)	52
3.3	Delineamento da pesquisa	53
3.3.1	Fase 01: Proposição da usina	54
3.3.2	Fase 02: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	55
3.3.2.1	Definição do objetivo e escopo.....	55
3.3.2.2	Análise do Inventário do Ciclo de Vida.....	57
3.3.2.3	Avaliação dos impactos	59
3.3.3	Fase 03: Análise dos resultados	60
4	RESULTADOS	61
4.1	Resultados extraídos da Revisão Sistemática da Literatura.....	61
4.2	Fase 01: Proposição da usina	63
4.3	Fase 02: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	65
4.3.1	Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	65
4.3.1.1	Processos de transporte.....	66
4.3.1.2	Movimentação por retroescavadeira.....	68
4.3.1.3	Reciclagem de RCC.....	68
4.3.2	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)	69
4.4	Fase 03: Análise dos Resultados	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS	81
	Anexo A – Principais resultados da Revisão Sistemática da Literatura	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização, justificativa e problema de pesquisa

O gerenciamento de resíduos sólidos é um problema de âmbito global que atinge todos os países e classes econômicas. Um relatório do *The World Bank* (KAZA et al., 2018) mostra que, até 2050, a taxa de geração de resíduos sólidos crescerá mais que o dobro da taxa de aumento da população mundial, o que indica a necessidade de ações concretas que revertam essa realidade. Em 2016, foram gerados 2,01 bilhões de toneladas de resíduos em todo o mundo. Somente no Brasil, em 2020, foram gerados cerca de 83,5 milhões de toneladas, sendo que 40% do resíduo coletado é disposto de forma inadequada em lixões e aterros não controlados (ABRELPE, 2021).

Os resíduos da construção civil (RCC) representam, aproximadamente, 35% de toda a quantidade de resíduos sólidos gerados no mundo, sendo que esse tipo de resíduo geralmente é disposto em locais inadequados e sem gestão eficaz (MAUÉS et al., 2020). No Brasil, esse valor chega a 57% do total de resíduo sólido gerado, o que representa uma geração *per capita* em torno de 221,2 kg/hab/ano (ABRELPE, 2021). A aceleração da urbanização, acompanhada do desenvolvimento vertiginoso da construção civil são fatores que justificam essa alta taxa de geração e, além disso, a disposição ilegal deste tipo de resíduo contribui para o aumento da poluição nas suas diversas formas, fazendo com que aumente a urgência mundial em se discutir o tema (HAO et al., 2019).

Nesse sentido, o Brasil tem tomado medidas que minimizem a problemática enfrentada com o descarte inadequado de resíduos sólidos. A Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Com a aprovação desta lei, vários mecanismos foram adotados a fim de cumprir a meta de eliminação de lixões a céu aberto no país como, por exemplo, a elaboração dos planos municipais de gerenciamento de resíduos sólidos, sendo esta condição para o repasse de verbas da União ao Distrito Federal e municípios (BRASIL, 2010). A lei mostra ainda que deve ser priorizada a não geração de resíduos, seguida da redução, reutilização, reciclagem e disposição final (BRASIL, 2010). Na construção civil, a reciclagem surge como uma ampla colaboradora na implementação das políticas de logística reversa, haja vista que cerca de 80% do resíduo gerado neste setor possui potencial para ser

reciclado, podendo substituir o agregado natural normalmente utilizado nas obras (ORTIZ; PASQUALINO; CASTELLS, 2010). Delbianco (2018) justifica a importância disso para regiões densamente povoadas, onde existem poucas áreas disponíveis para a implantação de aterros.

O que se vê, no entanto, é uma dificuldade em se realizar a gestão de resíduos gerados e, particularmente, em se implantar usinas de reciclagem de RCC no Brasil. Kern et al. (2021) apontam dois fatores que justificam tal problema: a) a ausência de planos municipais de gerenciamento de resíduos sólidos na maioria das cidades brasileiras e b) a falta de legislação que incentive o consumo de materiais recicláveis. A região Centro-Sul brasileira possui uma maior concentração de usinas, enquanto a região Norte é a única a não dispor de instalações para reciclagem de resíduos da construção (PIZONI, 2019).

Apesar dos benefícios de se reciclar resíduos da construção, os impactos ambientais decorrentes dessa atividade podem ser altos, a depender da forma que o gerenciamento está configurado. Borghi, Pantini e Rigamonti (2018) e Rosado et al. (2019), por exemplo, identificaram impactos importantes derivados do transporte de resíduos. Penteado e Rosado (2016) constataram que, para a cidade de Limeira-SP, a reciclagem só compensa caso a distância entre o gerador e a usina não ultrapasse 30 km. Isso indica a necessidade de se avaliar um sistema de gerenciamento de resíduos da construção civil, a fim de escolher a configuração que seja ambientalmente viável.

A maneira mais apropriada para realizar a medição de impactos de sistemas de gerenciamento de resíduos é através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Clift, Doig e Finnveden (2000) afirmam que a ACV fornece uma estrutura adequada para comparação de diferentes estratégias e tecnologias que envolvam o gerenciamento de resíduos. A NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) define ACV como sendo a compilação de todas as entradas e saídas de um sistema de produto, a fim de se avaliar os possíveis impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida. Ainda segundo a norma, a Avaliação do Ciclo de Vida fornece subsídios para identificação de oportunidades que melhorem o desempenho ambiental de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida (ABNT, 2009a).

Na Região Norte, mais especificamente na cidade de Belém e sua região metropolitana, é grande a necessidade de se implantar um sistema de gerenciamento de resíduos da construção civil que minimize os problemas relacionados ao descarte irregular e disposição em aterros não licenciados. O Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém (BELÉM,

2020) destaca que o município possui uma geração considerável de resíduos da construção civil, sendo que a população tem o costume de dispor os mesmos em vias, calçadas, logradouros públicos e canais de drenagem, o que obriga a prefeitura a manter o serviço de coleta deste tipo de resíduo, apesar da responsabilidade ser do gerador. A administração municipal também dispõe de quatro áreas para destinação final, que recebem o resíduo inerte, mesmo sem a adequabilidade necessária e sem o licenciamento ambiental (BELÉM, 2020a). Ainda assim, este plano adota como cenário de melhoria apenas a concepção de aterros licenciados para a deposição de resíduos inertes, não aproveitando as potencialidades que os resíduos da construção possuem de serem reciclados, como prevê o PNRS. Isso justifica a necessidade de se implantar um sistema de gerenciamento de resíduos da construção que contemple os benefícios da reciclagem, por conta da alta geração deste tipo de resíduo. E para isso, avaliar a configuração que impacte de forma menos intensa o meio ambiente deve ser critério para tomada de decisão.

Com base na problemática descrita, este estudo tem o objetivo de responder a seguinte questão de pesquisa: quais os impactos ambientais envolvidos na operação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) na Região Metropolitana de Belém?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os possíveis impactos ambientais relativos à operação futura de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil na Região Metropolitana de Belém, através de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a proposição de uma usina de reciclagem de resíduos da construção para a Região Metropolitana de Belém, determinando o local de implantação, capacidade de produção e equipamentos necessários para o funcionamento;
- Realizar o inventário do ciclo de vida de operação da usina de reciclagem proposta;
- Quantificar os impactos ambientais decorrentes do sistema avaliado.
- Com base nos resultados da ACV, identificar os processos críticos do sistema e propor soluções, baseadas em outros estudos, que minimizem os impactos ambientais, de modo a se obter um sistema ambientalmente eficaz.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo é esta introdução, onde se faz a contextualização e a justificativa, se apresenta a questão de pesquisa e os objetivos principais e secundários que norteiam este trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica necessária para a realização deste trabalho, onde são levantados os aspectos teóricos relacionados à gestão de resíduos sólidos e resíduos da construção civil (RCC), além das características apresentadas pelas usinas de reciclagem de resíduos da construção civil e o contexto atual da gestão dos resíduos da construção na Região Metropolitana de Belém; abordagem teórica sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e os estudos de avaliação do ciclo de vida aplicados aos sistemas de gerenciamento de resíduos da construção.

No capítulo três são descritos os procedimentos metodológicos adotados a fim de se atingir os objetivos definidos no item 1.2. Primeiramente é feita a classificação da pesquisa e a descrição detalhada da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) que foi realizada. Depois é descrito o delineamento do estudo com a caracterização de cada uma das fases de estudo: (i) proposição da usina de reciclagem de RCC a ser implantada; (ii) elaboração da Avaliação do Ciclo de Vida para a usina a ser implantada, de acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e (iii) análise dos resultados e proposição de soluções que se adequem a realidade local.

No quarto capítulo, serão mostrados os resultados para esta pesquisa, que contempla os dados relativos à Revisão Sistemática da Literatura (RSL), proposição da usina de reciclagem de RCC e estudo de Avaliação do Ciclo de Vida para operação deste empreendimento, mostrando, por fim, os processos que causam os maiores impactos ambientais e as soluções que melhor se adaptam à realidade local.

No capítulo cinco, são apresentadas as considerações finais e as sugestões de estudos que surgem a partir da realização deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a base teórica para o desenvolvimento desta pesquisa, abordando desde a gestão dos resíduos sólidos urbanos, passando pelo gerenciamento dos resíduos da construção civil, seu beneficiamento, aplicação em obras civis e caracterização da gestão dos RCC na Região Metropolitana de Belém, e as principais características sobre Avaliação do Ciclo de Vida e sua aplicação no gerenciamento dos RCC.

2.1 A gestão de resíduos sólidos urbanos

As preocupações com a sustentabilidade ambiental aumentam no mesmo ritmo de crescimento dos impactos ambientais, uma vez que esse tema tem se tornado frequente no cenário de negócios. Cada vez mais as empresas e sociedade civil discutem a preservação dos recursos naturais e propõem metas para, por exemplo, reduzir poluentes, frear o aumento do nível dos mares e zerar o descarte irregular de resíduos sólidos (DE OLIVEIRA et al., 2021; DIAS; BRAGA, 2016).

Nesse sentido, discutir a temática dos resíduos sólidos é uma das prioridades no âmbito do desenvolvimento sustentável, especialmente nos países sub-desenvolvidos (DANISH et al., 2019). Nos últimos anos, houve um aumento significativo na produção de resíduos ao redor do mundo. Isso se dá, basicamente, pelo crescimento desordenado da população e da renda *per capita*, o que leva as pessoas consumirem mais e, conseqüentemente, gerarem mais lixo (ABU HAJAR et al., 2020).

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a, p.1), os resíduos sólidos são definidos como “resíduos no estado sólido e semi-sólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, serviços e de varrição”. Esta mesma norma classifica os resíduos em dois grandes grupos:

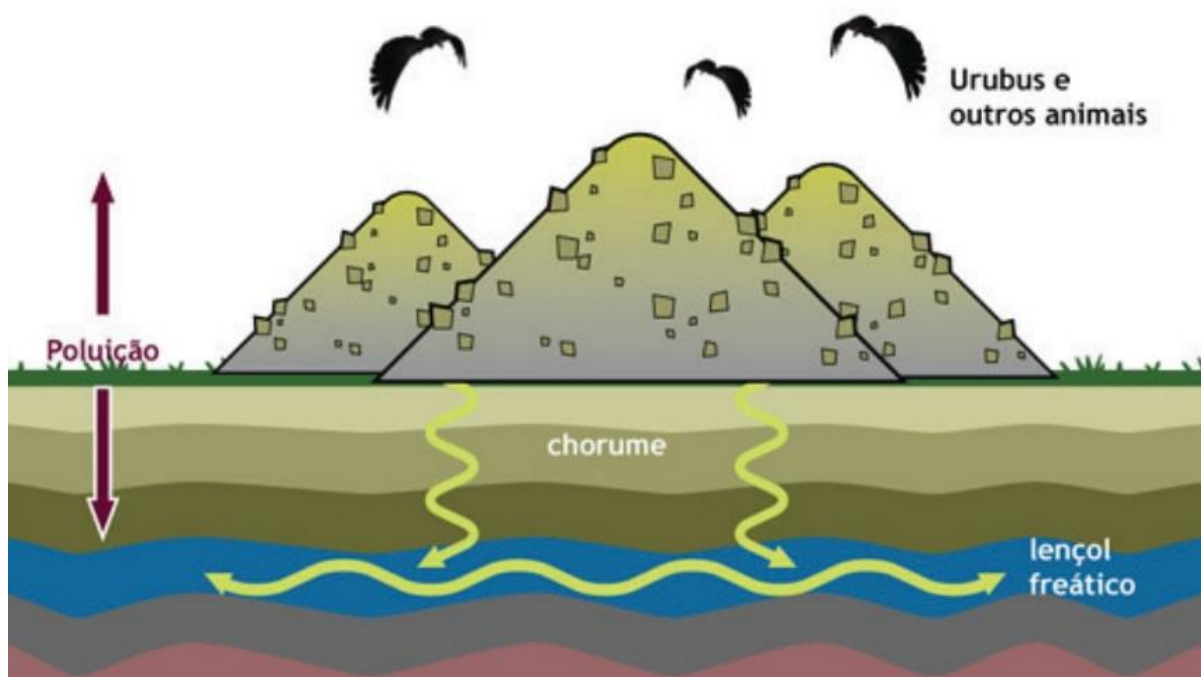
- a) Classe I – Perigosos: quando o resíduo apresenta periculosidade, ou seja, um risco à saúde pública ou ao meio ambiente.
- b) Classe II – Não perigosos: resíduos que não se enquadram no grupo anterior. São divididos em duas sub-categorias: Classe II-A (não inertes) que são resíduos que apresentam biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água; Classe II-B

(inertes), sendo quaisquer resíduos que não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Entre 2010 e 2019, a geração de resíduos sólidos no Brasil sofreu um incremento de 18%, saltando de 67 para 79 milhões de toneladas ao ano (ABRELPE, 2020). Isso faz com que o país esteja entre os que mais geram resíduos em todo mundo, sendo forte a ocorrência de disposição irregular (FLAMINI, 2021).

Existem três formas de se dispor os resíduos sólidos, segundo Flamini (2021): lixões, aterros controlados ou aterros sanitários. Os lixões (figura 2.1) são locais em que os resíduos são dispostos sem nenhum controle, formando grandes depósitos a céu aberto e sem impermeabilização do solo. Por conta disso, o chorume (líquido poluente que se forma a partir da decomposição do material orgânico) penetra no solo e o contamina, além de poluir os lençóis freáticos.

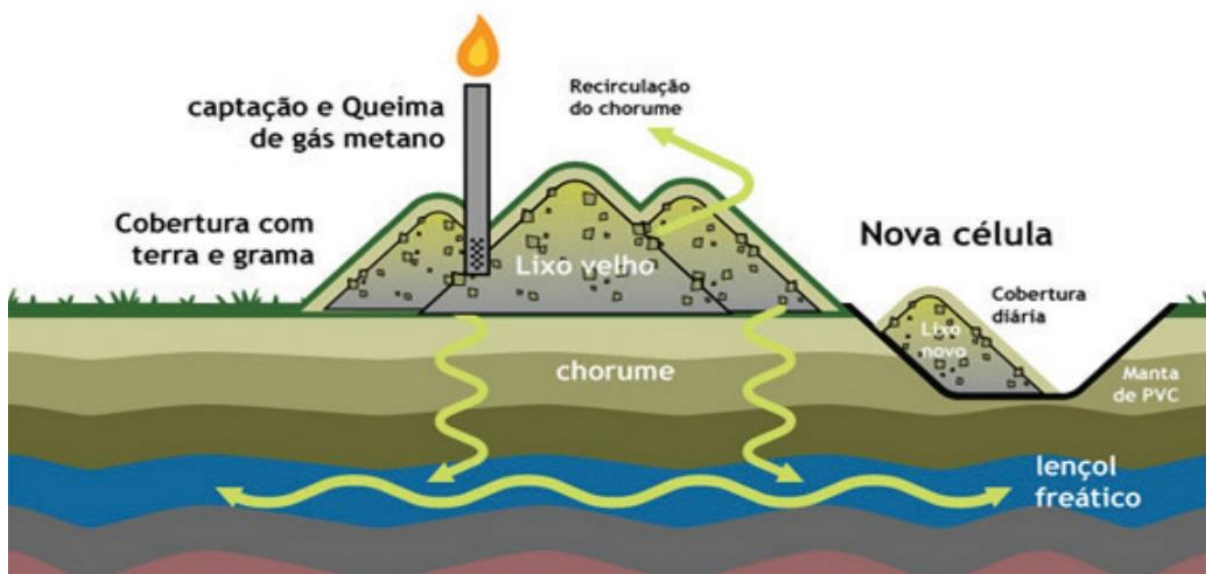
Figura 2.1: disposição de resíduos sólidos em lixões



Fonte: FLAMINI (2021)

Por sua vez, os aterros controlados (figura 2.2) se posicionam como o meio termo entre o lixão e o aterro sanitário, por serem antigos lixões que passaram por alguma intervenção. Neste caso, os resíduos recebem uma cobertura, geralmente vegetal, mas a impermeabilização do solo não é eficiente, não solucionando o problema com o chorume (FLAMINI, 2021).

Figura 2.2: disposição de resíduos sólidos em aterros controlados



Fonte: FLAMINI (2021)

Por fim, os aterros sanitários (figura 2.3) são obras licenciadas de engenharia, que seguem os requisitos das normas técnicas brasileiras. Neste caso, os resíduos são armazenados com cobertura e há uma camada de impermeabilização e tratamento do chorume. Apesar disso, o aterro sanitário possui algumas desvantagens, como: necessidade de grandes áreas para implantação, manutenção constante e vida útil limitada (FLAMINI, 2021).

Figura 2.3: disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários



Fonte: FLAMINI (2021)

Os impactos referentes à disposição de resíduos sólidos são diversos. Um gerenciamento ineficaz pode levar à contaminação do solo e lençóis freáticos, além de poluir o ar (DALMO et al., 2019). Essa ineficácia também contribui para o aumento na emissão de gases do efeito estufa (ABU HAJAR et al., 2020). Diante dessa problemática, vários estudos vêm sendo conduzidos com o objetivo de se investigar a magnitude dos impactos ambientais referentes aos diversos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos, utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida como método de análise (MALMIR; RANJBAR; EICKER, 2020). Alguns desses estudos foram conduzidos no Brasil e mostram que os aterros sanitários, comuns na realidade brasileira, possuem altas taxas de emissões de CO₂, apontando caminhos que priorizam a reutilização, a reciclagem e a coleta seletiva (GOULART COELHO; LANGE, 2018; LIIKANEN et al., 2018; PAES et al., 2020a, 2020b).

Assim, na última década, o Brasil tomou medidas que buscaram minimizar os problemas enfrentados com o descarte irregular de resíduos sólidos, além de propor a redução na operação de aterros sanitários. Com a aplicação da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), cujo objetivo era estabelecer diretrizes à gestão integrada de resíduos sólidos no país. A PNRS afirma ainda que na gestão dos resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente amigável. Sendo assim, a referida lei propõe a criação dos chamados planos de resíduos sólidos, no âmbito federal, estadual e municipal, com o objetivo de diagnosticar a situação local e propor melhorias de acordo com as peculiaridades de cada um. Além disso, alguns geradores têm a responsabilidade de elaborar o plano de gerenciamento de resíduos sólidos para o empreendimento ou atividade desenvolvida, com o intuito de diagnosticar e implantar de forma eficaz o sistema. As empresas de construção civil, por exemplo, devem obedecer a esse parâmetro (BRASIL, 2010).

2.2 Resíduos da Construção Civil (RCC)

A construção civil é uma das principais indústrias do mundo, responsável por contribuir, direta e indiretamente, com o desenvolvimento econômico e social de diversos países, através de projetos de infraestrutura como, por exemplo, estradas, escolas e hospitais, especialmente nos países em desenvolvimento como o Brasil. No entanto, um grande problema desta indústria está relacionada com as altas taxas de desperdício de materiais (HUSSIN; RAHMAN; MEMON, 2013).

Além dos prejuízos diretos no gerenciamento do canteiro de obras – perda de produtividade, perda de material, atrasos no cronograma e perdas financeiras (HUSSIN; RAHMAN; MEMON, 2013) – os resíduos da construção civil (RCC) também causam impactos ao meio ambiente: na maioria dos casos, apesar de não representarem ameaça direta à natureza por se tratarem de resíduos inertes, sua disposição acentuada e irregular é a grande causadora dos problemas ambientais (BRASIL, 2005). Córdoba (2010) corrobora ao dizer que o descarte irregular de resíduos em córregos, vias públicas e terrenos baldios traz sérios problemas de degradação ambiental, além de configurar riscos à saúde pública por conta da probabilidade de proliferação de insetos e animais peçonhentos. Portanto, pode-se perceber o prejuízo que a alta taxa de geração desse tipo de resíduo pode trazer ao meio ambiente: Maués et al. (2020), por exemplo, afirma que os RCC representam cerca de 35% do total de resíduos sólidos gerados no mundo, sendo que no Brasil esse valor ultrapassa os 50% (ABRELPE, 2020).

A fim de estabelecer diretrizes para o gerenciamento adequado de RCC no Brasil, em 2002 foi editada a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002). Esta resolução define os resíduos de construção como “[...] provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultados da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plástico, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha” (BRASIL, 2002, p.1). De forma semelhante, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define os resíduos de construção como sendo aqueles gerados em construções, reformas, reparos e demolições, além dos resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis (BRASIL, 2010).

A Resolução CONAMA nº 307/2002 sofreu três alterações no que diz respeito à classificação dos resíduos de construção civil: Resolução CONAMA nº 348 (BRASIL, 2004), Resolução CONAMA nº 431 (BRASIL, 2011) e Resolução CONAMA nº 469 (BRASIL, 2015). Portanto, considerando estas modificações, os RCC são classificados da seguinte forma:

- Classe A: são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, incluindo solos provenientes de terraplenagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; c) do processo de fabricação

e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios, etc.) produzidas no canteiro de obras;

- Classe B (redação alterada pela Resolução CONAMA nº 431/2011 e posteriormente alterada pela Resolução CONAMA nº 469/2015): resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plástico, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- Classe C (redação alterada pela Resolução CONAMA nº 431/2011): resíduos para os quais não foram desenvolvidos tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação;
- Classe D (redação alterada pela Resolução CONAMA nº 348/2004): resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Quando se trata de classificar os resíduos de construção civil quanto à periculosidade, eles são, na maioria das vezes, enquadrados na Classe II-B - resíduos não perigosos e inertes (ABNT, 2004a). Entretanto, alguns estudos sugerem que resíduos de construção podem ser enquadrados na classe II-A - não perigosos e não inertes (LIMA; CABRAL, 2013). Essa discordância parte da premissa de que os resíduos da construção possuem composição bastante variável, em virtude de fatores como posição geográfica, época do ano, tipo de obra, entre outros (OLIVEIRA et al., 2011). Cabral et al. (2009) afirma ainda que essa variação depende se a atividade é uma obra de construção ou reforma: no primeiro caso, a variação acompanha o estágio da obra (no estágio de concretagem, há maior incidência de fragmentos de concreto, aço e fôrmas de madeira, enquanto no estágio de acabamento a incidência é maior para restos de argamassas, telhas, tijolos e placas cerâmicas); no segundo caso, há uma incidência maior de materiais cerâmicos, madeiras, rochas naturais e vidros.

A Resolução CONAMA nº 307/2002 estabelece diversas diretrizes para a gestão de resíduos da construção civil (BRASIL, 2002). Algumas dessas diretrizes estão listadas abaixo:

- Responsabilidades dos geradores

Os geradores são considerados responsáveis pelos resíduos oriundos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de edificações e estradas, sendo que os mesmos devem priorizar a não geração de resíduos, seguida de redução, reutilização, reciclagem,

tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, em consonância com o que viria a ser proposto mais tarde pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Além disso, os geradores não podem dispor estes resíduos em áreas de bota-fora, encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por lei, devendo dar destinação específica a cada classe.

- **Elaboração dos Planos Municipais de Gestão de Resíduos da Construção Civil**

Os municípios e o Distrito Federal são obrigados a elaborarem seus próprios Planos Municipais de Gestão de Resíduos da Construção Civil, dentro daquilo que for proposto pelo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Este plano deve conter: a) diretrizes técnicas a serem seguidas pelos pequenos e grandes geradores (para os grandes geradores, estabelecimento de diretrizes para a elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, como será visto mais adiante); b) cadastramento de áreas públicas ou privadas que farão manejo de resíduos; c) estabelecimento de processos de licenciamento para as áreas cadastradas; entre outros.

- **Elaboração dos Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil**

Devem ser elaborados pelos grandes geradores a fim de estabelecer as práticas necessárias para o manejo e disposição ambientalmente adequada dos resíduos. Deve conter as seguintes etapas: a) caracterização do resíduo (identificação e quantificação); b) descrição do processo de triagem, caso seja realizada na fonte geradora; c) descrição da forma de acondicionamento do resíduo, desde a geração até a etapa de transporte; d) descrição do processo de transporte até o ponto de beneficiamento ou disposição final; e) descrição da destinação final.

- **Formas de destinação dos resíduos da construção civil**

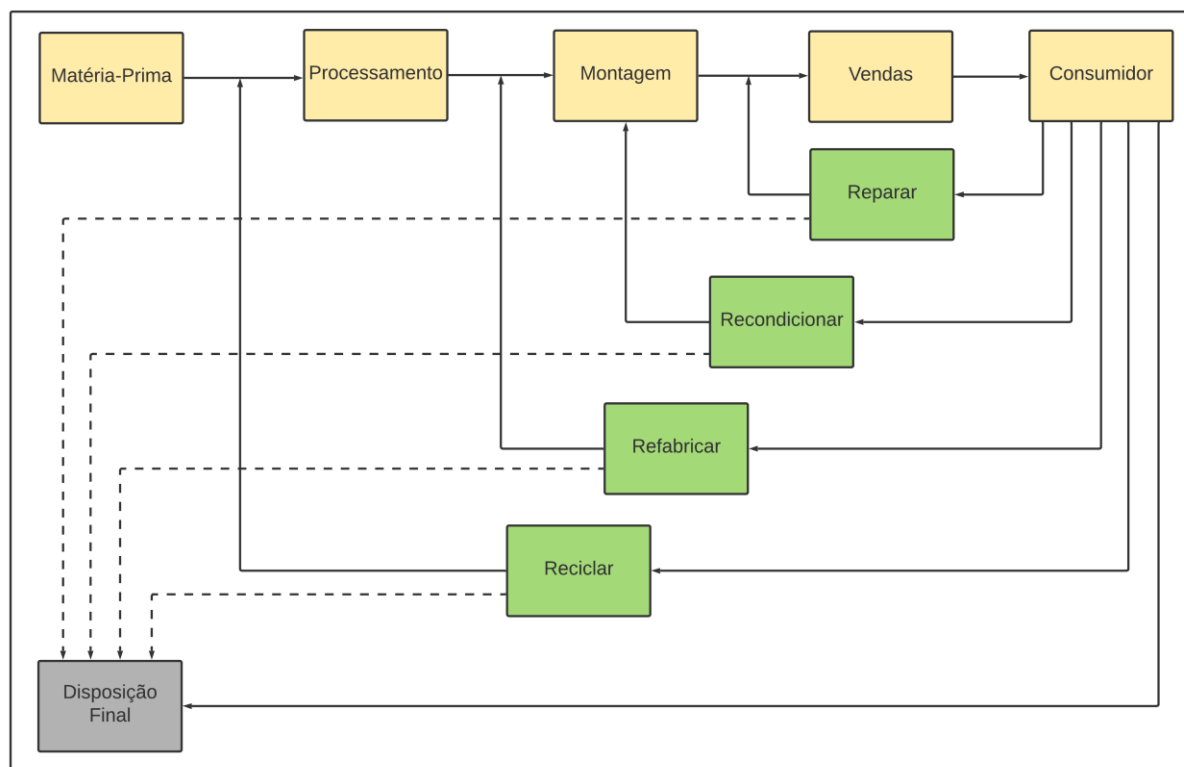
Após o processo de triagem, os resíduos devem ser destinados das seguintes formas: o resíduo classe A deve ser reutilizado ou reciclado na forma de agregados ou, ainda, encaminhados a aterros de resíduos classe A para uso futuro; o resíduo classe B deve ser reutilizado, reciclado ou encaminhado para áreas de armazenamento temporário, de modo a permitir sua reutilização ou reciclagem no futuro; os resíduos classes c e d devem ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com normas técnicas específicas.

Apesar das diretrizes estabelecidas há duas décadas, ainda se percebe a ocorrência de disposições irregulares de resíduos da construção em alguns lugares. E o impacto ambiental causado por essa prática pode trazer graves consequências a longo prazo, mesmo que estudos de ciclo de vida de edifícios indiquem que a fase de utilização é a que causa mais prejuízos sob o ponto de vista ambiental (ORTIZ; PASQUALINO; CASTELLS, 2010). Rosado (2015) aponta nesse sentido, ao dizer que muitas cidades brasileiras sofrem com a disposição irregular de resíduos da construção civil e, pelo fato de os resíduos da construção representarem uma parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos de um município, acabam sobrecarregando o serviço de coleta local, indo na contramão daquilo que estabelece a responsabilidade do gerador no manejo dos resíduos de construção.

A fim de mudar esta realidade, a logística reversa vem sendo amplamente debatida, principalmente naquilo que se chama gestão da cadeia de suprimentos de ciclo fechado – *closed loop supply chain management* (GOVINDAN; SOLEIMANI, 2017). Amin e Zhang (2013) definem logística reversa como um processo na cadeia de suprimentos que busca a refabricação de produtos a partir do resíduo gerado, agregando valor a este resíduo. Por sua vez, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define logística reversa da seguinte forma: “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010, p.2). A figura 2.4 mostra o papel da logística reversa dentro da cadeia de suprimentos de um determinado produto.

Ahmed e Zhang (2021) destacam que a logística reversa aplicada à gestão de resíduos de construção é altamente benéfica, devido à recuperação de materiais e o desvio de resíduos do aterro, garantindo uma boa relação custo-benefício e soluções ambientalmente corretas. Nesse sentido e apoiado por aquilo que mostra a figura 2.4, a reciclagem de resíduos da construção, transformando-os em agregado reciclado, contribui, ao mesmo tempo, com as práticas de logística reversa e com a Resolução CONAMA nº 307, naquilo que diz respeito à destinação que deve ser dada ao resíduo classe A (BRASIL, 2002).

Figura 2.4: ilustração do funcionamento da logística reversa na cadeia de suprimentos



Fonte: adaptado de Khor e Udin (2012)

O período pós-Segunda Guerra Mundial marcou o início dos estudos com agregado reciclado, haja vista que a Europa precisava encontrar uma solução à grande quantidade de resíduo contido nos destroços da guerra (HELENE; LEVY, 2002). Portanto, países como Bélgica, Alemanha e Holanda começam a obter os primeiros frutos das aplicações de agregados reciclados em obras de engenharia no início da década de 80. A partir daí, outros países vêm trabalhando para a incorporação desse material, sendo que a aplicação varia em cada localidade (ALBERTE; HANDRO, 2021).

No Brasil, a gestão de resíduos de construção para fins de produção de agregado reciclado só inicia em 1993 na cidade de Belo Horizonte, o que serviu de subsídio para as resoluções da CONAMA que viriam a ser implementadas anos mais tarde (MELO, 2011). Em 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou normas relacionadas ao uso de agregado reciclado em obras de engenharia: a NBR 15115 (ABNT, 2004b), que estabelece os critérios para utilização de agregado reciclado em obras de pavimentação, e a NBR 15116 (ABNT, 2004c) que dispõe sobre os requisitos para a utilização desse material em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

A NBR 15115 (ABNT, 2004b, p.2) define agregado reciclado da seguinte forma: “material granular, obtido por britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos da construção civil classificados como resíduo de construção classe “A” [...]”. Quanto à classificação, Alberte e Handro (2021) observam que cada país possui seu próprio critério de proporção e denominação das classificações, mas que, no geral, essas classificações seguem a proporção de dois componentes presentes no agregado reciclado, sendo estes material cerâmico e material cimentício e natural, o que permite estabelecer uma classificação unificada baseada na composição. Para a realidade brasileira, a NBR 15116 (ABNT, 2004c) classifica os agregados reciclados em dois grupos distintos:

- a) Agregado de resíduo de concreto (ARC): agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo classe A e que possui em sua composição ao menos 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- b) Agregado de resíduo misto (ARM): agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo classe A e que possui em sua composição menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Ângulo e Figueiredo (2011) destacam a necessidade de se aplicar o agregado reciclado na pavimentação e no concreto, destinos mais comuns para este tipo de material. Para os autores, quando se faz um controle adequado dos teores de substituição e porosidade dos agregados de RCC, torna-se possível seu uso em concreto estrutural, apesar da NBR 15116 (ABNT, 2004c) limitar seu uso em concreto não estrutural, com resistência máxima permitida de 15 MPa. No caso de uso em obras de pavimentação, esta mesma norma prescreve o uso de agregado reciclado em reforço de subleito, sub-base de pavimento e revestimento primário, além do uso em base de pavimento (ABNT, 2004c).

2.3 Usinas de Reciclagem de RCC

2.3.1 Definição e classificação

O beneficiamento de resíduos da construção civil só é possível através do funcionamento de uma usina de reciclagem para este tipo de resíduo. A NBR 15114 (ABNT, 2004d) define este empreendimento como área destinada ao recebimento e transformação do RCC, de modo a se produzir agregado reciclado. Angulo (2005) destaca que o processo de reciclagem consiste em uma sequência de operações com o objetivo de se produzir um agregado

que possua qualidade física e química adequada à sua reutilização na indústria. O mesmo autor ainda menciona o fato de não haver transformações na estrutura interna do material, o que traz ainda mais benefícios ao se praticar o beneficiamento desse tipo de material.

Existem dois tipos de plantas de reciclagem de RCC: usinas de planta fixas ou móveis (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017). Sobral (2012) destaca um terceiro tipo de planta: as semi-móveis. Elas diferem entre si pela forma como são instaladas.

As usinas de planta fixa (figura 2.5) são as mais recorrentes no Brasil (DELBIANCO, 2018). Este tipo de planta se destaca por possuir uma localização definitiva e um número maior de equipamentos, o que proporciona a produção de agregados de alta qualidade se comparados com os outros tipos de plantas (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017; SOBRAL, 2012). Além disso, é possível obter materiais de diferentes granulometrias (DELBIANCO, 2018). Uma grande desvantagem na usina de planta fixa é o alto investimento inicial, devido à compra de equipamentos, gastos com obra civil e aquisição de terreno para instalação (SOBRAL, 2012).

Figura 2.5: usina de planta fixa



Fonte: TRIBUNA (2021)

As usinas de planta móvel (figura 2.6) são muito utilizadas em obras civis que exigem mobilização constante como, por exemplo, na construção de estradas, ou quando se deseja reduzir a distância entre o local de processamento e o local de aplicação. Geralmente, este tipo de usina é instalada sobre bases móveis que se deslocam conforme a necessidade exige. Como não exige obra civil e grandes equipamentos para sua implantação, os gastos iniciais são bem menores quando comparados com as usinas de planta fixa. Em contrapartida, os agregados

produzidos são de qualidade inferior, além de apresentar pouca variedade granulométrica (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; SOBRAL, 2012).

Figura 2.6: usina de planta móvel



Fonte: TELEDETRITUS (2021)

As usinas semi-móveis possuem características dos dois outros tipos (usinas fixas e móveis): elas permanecem fixas em um local por um período de tempo, podendo ser desmontada sempre que exigido. A facilidade no processo de desmontagem se dá por conta da sua instalação sobre bases metálicas. Geralmente, o uso deste tipo de planta se dá em obras de curto e médio prazo, onde se tem conhecimento prévio do tempo máximo de permanência (SOBRAL, 2012).

2.3.2 Critérios para implantação e operação de usinas de reciclagem

No Brasil, a NBR 15114 (ABNT, 2004d) é a norma responsável por descrever as diretrizes necessárias para implantação e operação de usinas de reciclagem de RCC. Ela se tornou um marco histórico por ser a primeira norma a tratar esta temática em todo o hemisfério sul (SOBRAL, 2012). Quanto à implantação, a norma exige o atendimento de critérios em seis itens: (i) localização; (ii) isolamento e sinalização; (iii) acessos; (iv) iluminação e energia; (v) proteção das águas superficiais e (vi) preparo da área de operação. Os itens relativos à operação são: (i) recebimento, triagem e processamento dos resíduos; (ii) treinamento e equipamentos de

segurança; (iii) inspeção e manutenção e (iv) procedimentos para controle e registro da operação (ABNT, 2004d). Todas as condições relativas a estes itens são detalhadas a seguir.

2.3.2.1 Condições de implantação de usinas de reciclagem de RCC

A escolha do local é o primeiro item a ser avaliado para a implantação de uma usina de reciclagem de RCC. A norma prescreve que o local escolhido deve ser tal que:

- a) o impacto ambiental a ser causado pela instalação seja minimizado;
- b) a aceitação da população que vive no entorno seja maximizada;
- c) esteja de acordo com a legislação de uso de solo e legislação ambiental.

Além disso, a escolha do local deve observar aspectos relacionados à hidrologia, vegetação e vias de acesso.

Quanto a questões relativas ao isolamento e sinalização, os seguintes critérios devem ser atendidos:

- a) cercamento de todo o perímetro da área de operação;
- b) portão para controle de acesso ao local;
- c) sinalização nas entradas e nas cercas, de modo a identificar o empreendimento;
- d) anteparo para proteção quanto aos aspectos relativos à vizinhança, ventos dominantes e estética (uso de cerca arbustiva ou arbórea, por exemplo).

A norma ainda especifica que os acessos internos e externos devem ser protegidos, executados e mantidos de maneira a permitir sua utilização sob qualquer condição climática. O local de reciclagem deve dispor de iluminação e energia que permitam uma ação de emergência a qualquer momento. O empreendimento deve, ainda, respeitar as faixas de proteção dos corpos d'água superficiais e possuir um sistema de drenagem que evite o acesso de água precipitada na área de reciclagem e o carreamento de material sólido para fora da usina. Além disso, a área deve ter superfície regularizada, possuir um local específico para armazenamento temporário de resíduos não recicláveis, sendo que deve ser previsto uma área coberta para o armazenamento temporário de resíduos classe D.

2.3.2.2 Condições de operação de usinas de reciclagem de RCC

A NBR 15114 (ABNT, 2004d) determina que somente podem ser aceitos na área de reciclagem os resíduos de construção civil classe A. Por isso, os resíduos devem ser

previamente triados antes do processo de reciclagem, podendo a área de triagem estar instalada dentro da usina, desde que atenda os requisitos da NBR 15112 (ABNT, 2004e). Os resíduos classes B, C e D devem ser encaminhados à destinação adequada, conforme orienta a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002).

A norma também descreve a necessidade de treinamento da equipe de funcionários, incluindo as formas de operação da usina e procedimentos a serem adotados em caso de emergência. O uso de equipamento de proteção individual (EPI) deve ser obrigatório. Fica obrigado o empreendimento a manter um plano de inspeção e manutenção, de modo a identificar e corrigir problemas que possam afetar o bom funcionamento da usina.

Os procedimentos de operação devem ser regidos pelo plano de operação, a conter os seguintes itens:

- a) controle de entrada dos resíduos recebidos;
- b) discriminação dos procedimentos de triagem, reciclagem, armazenamento e outras operações realizadas na usina;
- c) descrição e destinação dos resíduos a serem rejeitados;
- d) descrição e destinação dos resíduos a serem reutilizados;
- e) descrição e destinação dos resíduos a serem reciclados;
- f) controle de qualidade dos produtos gerados.

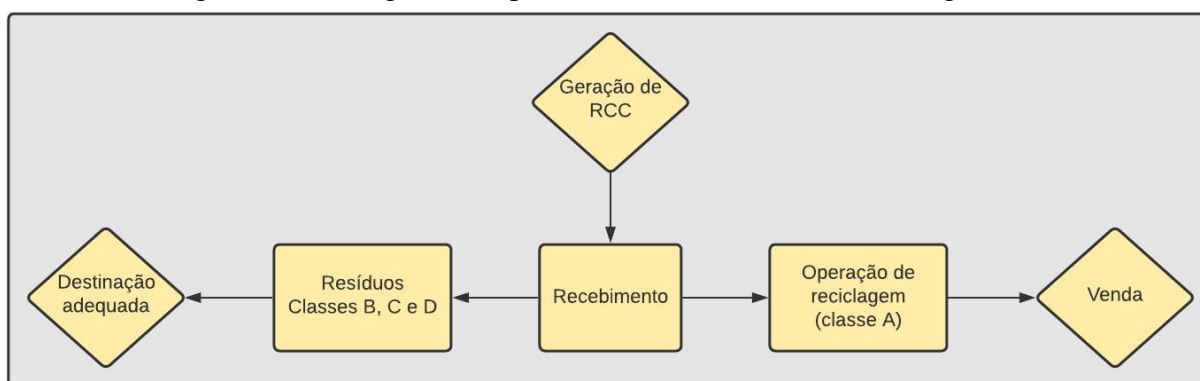
2.3.3 Procedimentos e equipamentos utilizados em usinas de reciclagem de RCC

O processo de beneficiamento de resíduos da construção é classificado em três tipos: primeira, segunda e terceira geração (HANSEN, 1992 *apud* JADOVSKI, 2005). No processo de primeira geração, mais simples, os contaminantes são removidos de forma manual e os metais ferrosos retirados através do uso de separadores magnéticos, descartando o uso de algum equipamento específico para esta finalidade. Os processos de segunda geração incorporam equipamentos mais sofisticados para remoção dos contaminantes, entretanto fragmentos de dimensões elevadas são removidos de forma manual antes da britagem. Os processos de terceira geração realizam a remoção integral de todo o material considerado contaminante, através do uso de separadores magnéticos, tanques de depuração e jatos de ar. Pizoni (2019) destaca que a maioria das plantas de reciclagem no Brasil são de primeira geração, pois a eliminação de contaminantes em plantas de segunda e terceira geração encarece o processo, podendo inviabilizar financeiramente o empreendimento.

As plantas de primeira geração, por sua vez, podem possuir sistema de britagem do tipo fechado ou aberto: no sistema fechado, o material não passante na peneira de maior abertura retorna para o equipamento de britagem, enquanto que, no sistema aberto, todo o material peneirado é estocado de acordo com a sua granulometria (JADOVSKI, 2005).

O fluxo produtivo consiste, basicamente, em três grandes fases, conforme observado por autores como Delbianco (2018), Jadovski (2005), Pizoni (2019), Silva; De Brito; Dhir (2017) e Sobral (2012): (i) recebimento do resíduo que chega do gerador, (ii) separação dos resíduos classe B, C e D e (iii) operação de reciclagem do resíduo classe A. A figura 2.7 detalha cada uma destas etapas. Entre os equipamentos utilizados na operação de reciclagem, a maioria das usinas brasileiras dispõem de alimentador vibratório, transportadores de correia, britador de impacto ou mandíbulas, separador magnético e peneira vibratória (MIRANDA, 2015 *apud* KERN et al., 2021).

Figura 2.7: fluxograma de processos de uma usina de reciclagem de RCC



Fonte: autoria própria

Na etapa de recebimento, o resíduo vindo da fonte geradora é descarregado no pátio de recepção. É realizada a pesagem e uma primeira inspeção visual no resíduo antes do descarregamento. Com o resíduo descarregado, é feita a triagem do material recebido, com o objetivo de separar o resíduo classe A das demais classes. Para este processo, geralmente são utilizados retroescavadeiras para espalhamento do entulho, além de esteiras de triagem e alimentador vibratório, como o da figura 2.8 (DELBIANCO, 2018; SOBRAL, 2012). Este último equipamento, como o próprio nome sugere, serve para alimentar os britadores ou outros equipamentos com material de grande granulometria (JADOVSKI, 2005). Também podem ser utilizados nesta etapa separadores magnéticos, com o objetivo de separar os materiais ferrosos. Sobral (2012) destaca que algumas usinas optam por separar os resíduos classe A em função da sua composição, sendo classificados como material cerâmico ou concretos. Quando isso ocorre, a reciclagem permite obter agregados com variadas características. O agregado derivado de

concreto se mostra mais homogêneo, apresentando alta resistência, sendo seu uso recomendado para argamassas e até mesmo concreto estrutural. O agregado derivado de material cerâmico, por sua vez, apresenta areias e pedriscos de baixa granulometria, tendo seu uso recomendado para composição de asfaltos e concretos que não apresentem função estrutural (SOBRAL, 2012). Isso mostra a importância do processo de triagem na qualidade do agregado a ser produzido.

Figura 2.8: alimentador vibratório



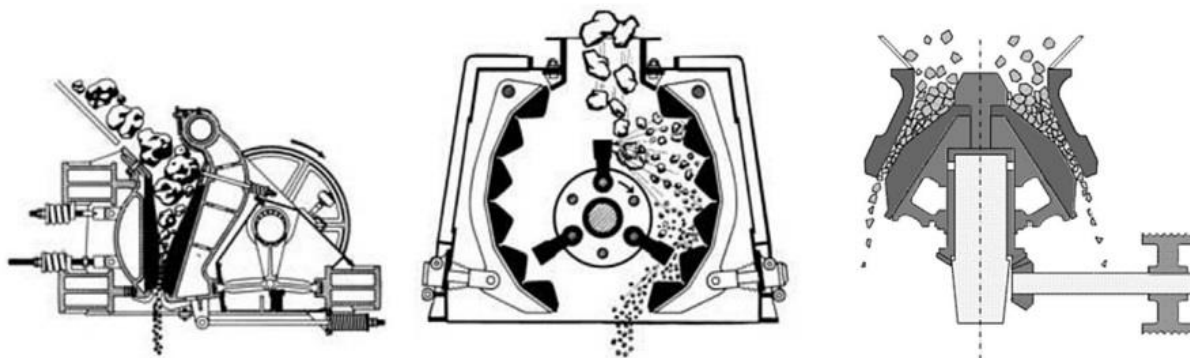
Fonte: PAMPEIRO (2021)

Realizada a triagem do resíduo recebido, os resíduos inservíveis para a produção de agregado reciclado são temporariamente armazenados em lugares apropriados e depois encaminhados à destinação adequada (SOBRAL, 2012). Feita a seleção e separação do resíduo classe A, o material é encaminhado para as operações de reciclagem. Nesta etapa, os seguintes equipamentos costumam ser utilizados:

- Britadores

Jadovski (2005) destaca que o britador é considerado o equipamento mais importante de uma usina de reciclagem e que a fase da britagem se caracteriza por corresponder a fase grosseira da cominuição dos materiais. Neves (2005), por sua vez, conceitua cominuição como sendo o processo pelo qual se reduz em partículas menores e de tamanhos variados o material submetido a este procedimento. São comuns o uso de britadores de mandíbulas e britadores de impacto, além dos britadores cônicos, demonstrados na figura 2.9 (DELBIANCO, 2018).

Figura 2.9: britador de mandíbula, impacto e cônico (da esquerda para a direita)



Fonte: SILVA; DE BRITO; DHIR (2017)

- Peneiras

O peneiramento consiste na separação das partículas que passaram pelo britador através de grelhas com aberturas de tamanhos variáveis. O objetivo é obter materiais de diferentes granulometrias. Os equipamentos que realizam este procedimento são as peneiras (figura 2.10), que podem ser fixas, grelhas, vibratórias e rotativas, sendo as duas últimas as mais comuns em plantas de reciclagem de RCC (DELBIANCO, 2018).

Figura 2.10: peneira vibratória



Fonte: MÁQUINAS FARIA (2021)

- Transportadores de correia

Os transportadores de correia (figura 2.11) são úteis para o transporte do resíduo processado entre um ponto e outro. São constituídos por uma correia sem fim que, ao se movimentar, apoia-se em roletes durante o percurso (DELBIANCO, 2018).

Figura 2.11: transportador de correia



Fonte: SOBRATEMA (2021).

2.4 A gestão dos RCC na Região Metropolitana de Belém

A cidade de Belém e arredores apresentam uma geração considerável de Resíduos da Construção Civil (RCC), muito por conta do crescimento populacional e da verticalização apresentada nas últimas décadas. Apesar da responsabilidade por esse resíduo ser de quem gera, conforme prevê a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), o que se vê é a disposição do mesmo em vias, calçadas e logradouros públicos, como exemplificado na figura 2.12.

Dessa maneira, a administração pública municipal e empresas privadas realizam a coleta de RCC através de roteiros programados, utilizando caminhão do tipo basculante (BELÉM, 2020a). Entretanto, devido a grande quantidade de resíduos e por conta da falta de colaboração e conscientização da população, a gestão não é realizada de forma satisfatória. Além disso, a coleta de RCC é realizada juntamente com outros tipos de resíduos, o que dificulta a segregação para posterior aproveitamento deste resíduo (LEITE, 2019).

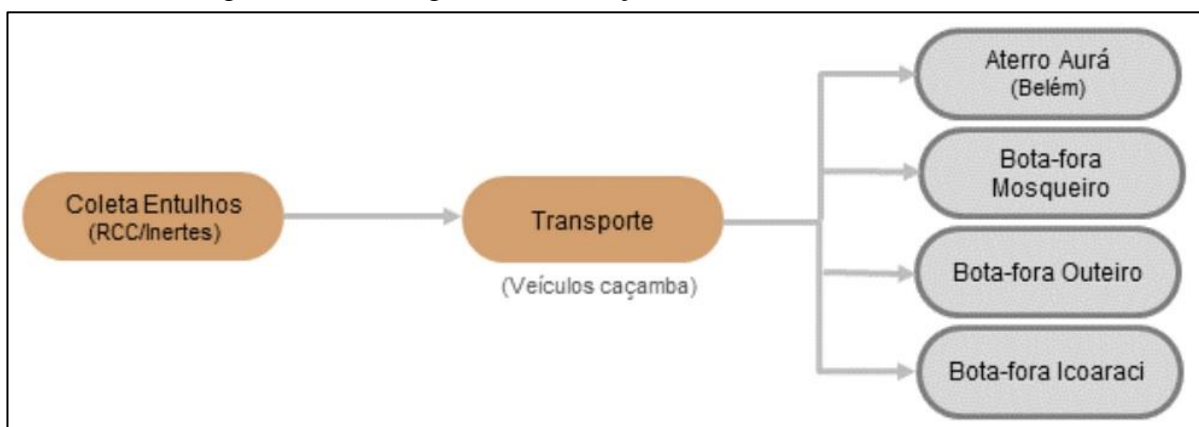
Figura 2.12: disposição de resíduo da construção sobre a calçada em um bairro de Belém



Fonte: Agência Belém (2022)

A figura 2.13 apresenta um fluxograma da forma como está configurado o manejo dos resíduos da construção na cidade de Belém, de acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico (BELÉM, 2020a): o resíduo é transportado, através de administração municipal ou empresas privadas, para áreas de bota-fora, como disposição final. Isso contraria o que diz a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), que proíbe a disposição de RCC em áreas de bota-fora.

Figura 2.13: fluxograma do serviço de coleta de RCC em Belém.



Fonte: Belém (2020a)

Como pode ser visto, funcionam na cidade quatro áreas de bota-fora. O Plano Municipal de Saneamento Básico (BELÉM, 2020a) salienta que, para esses locais, são levados

outros materiais não inertes, vindos principalmente da limpeza e dragagem de canais de drenagem, que possuem carga orgânica elevada e alta taxa de contaminação.

Das quatro áreas de destinação final de RCC, o Aterro do Aurá pode ser considerado o que recebe a maior quantidade de resíduos. Este local fica em uma área que faz limite com o município de Ananindeua, distante aproximadamente 13 km do centro da cidade, ficando a 5 km de sua entrada principal, pela Rodovia BR-316, principal via de ligação de Belém com os outros municípios de sua Região Metropolitana (BELÉM, 2020a).

O Aterro do Aurá começou a operar em 1990, chegando a receber cerca de 1300 toneladas ao dia de resíduos domiciliares de diversos municípios da Região Metropolitana de Belém, de forma descontrolada, tornando o local conhecido como “Lixão do Aurá”. Em 2015, para atender as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), foi assinado um Termo de Ajustamento de Conduta que permitiu a desativação do antigo lixão. A partir daí, o resíduo sólido urbano que era encaminhado ao “Lixão do Aurá” passou a ser encaminhado ao Aterro Sanitário de Marituba. Desde então, a área onde funcionava o lixão atua como local para disposição de resíduos da construção e materiais retirados da limpeza e dragagem de canais de drenagem, sendo denominado como “Complexo de Destino Final do Aurá” (BELÉM, 2020a; LIMA e ABREU, 2022).

Para mudar o cenário atual, o Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém considera a criação de Ecopontos, para destinação de resíduos da construção oriundos de pequenos geradores. Para os grandes geradores, o plano determina a contratação de empresas especializadas em coleta de RCC, que encaminhem este resíduo para disposição final em aterro licenciados de resíduos inertes (BELÉM, 2020b). Entretanto, os impactos ambientais da disposição de RCC em aterro são grandes, como será visto mais adiante, se comparados com outras alternativas de gerenciamento, como a reciclagem, por exemplo.

2.5 Avaliação do Ciclo de Vida como instrumento para verificação de impactos ambientais

2.5.1 Definição

A técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consiste em medir as emissões decorrentes da fabricação ou utilização de um determinado produto ou serviço. Essas emissões podem causar impactos ao meio ambiente das mais variadas formas. Dessa maneira, os fluxos

de matéria e energia envolvidos no ciclo de vida do objeto de estudo são quantificados e relacionados a uma categoria de impacto ambiental. Os resultados permitem compreender os danos ou benefícios envolvidos na fabricação ou uso de um produto ou serviço. Uma ACV pode ser elaborada tanto por pesquisadores que buscam ampliar os conhecimentos a respeito dos fenômenos ambientais quanto por entidades privadas ou mesmo governamentais, que buscam melhorar seus produtos ou estabelecer políticas públicas que fomentem a sustentabilidade (IBICT, 2021). A realização de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida permite, ainda, evitar que a solução de um problema ambiental cause outros problemas (melhores tecnologias de produção causando problemas relacionados à resíduos, por exemplo). Isso acontece por causa da consideração de todo o ciclo de vida do produto (IBICT, 2014).

A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida é regida pelo sistema de normas ISO 14000, que buscam uniformizar procedimentos necessários para a obtenção de certificações ambientais (VALLE, 2006 *apud* ROSADO, 2015). Em 1997 surge a primeira norma relacionada à prática de ACV, a ISO 14040. Nos anos posteriores, mais três normas relacionadas à temática foram publicadas (ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043), sendo que em 2006 as quatro normas existentes foram compiladas em duas (ISO 14040 e ISO 14044). Em 2009 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou versões traduzidas das duas normas existentes, detalhadas na quadro 2.1 (ROSADO, 2015).

Quadro 2.1: normas que estabelecem diretrizes para a elaboração de uma ACV	
Norma	Título
NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a)	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura
NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b)	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações

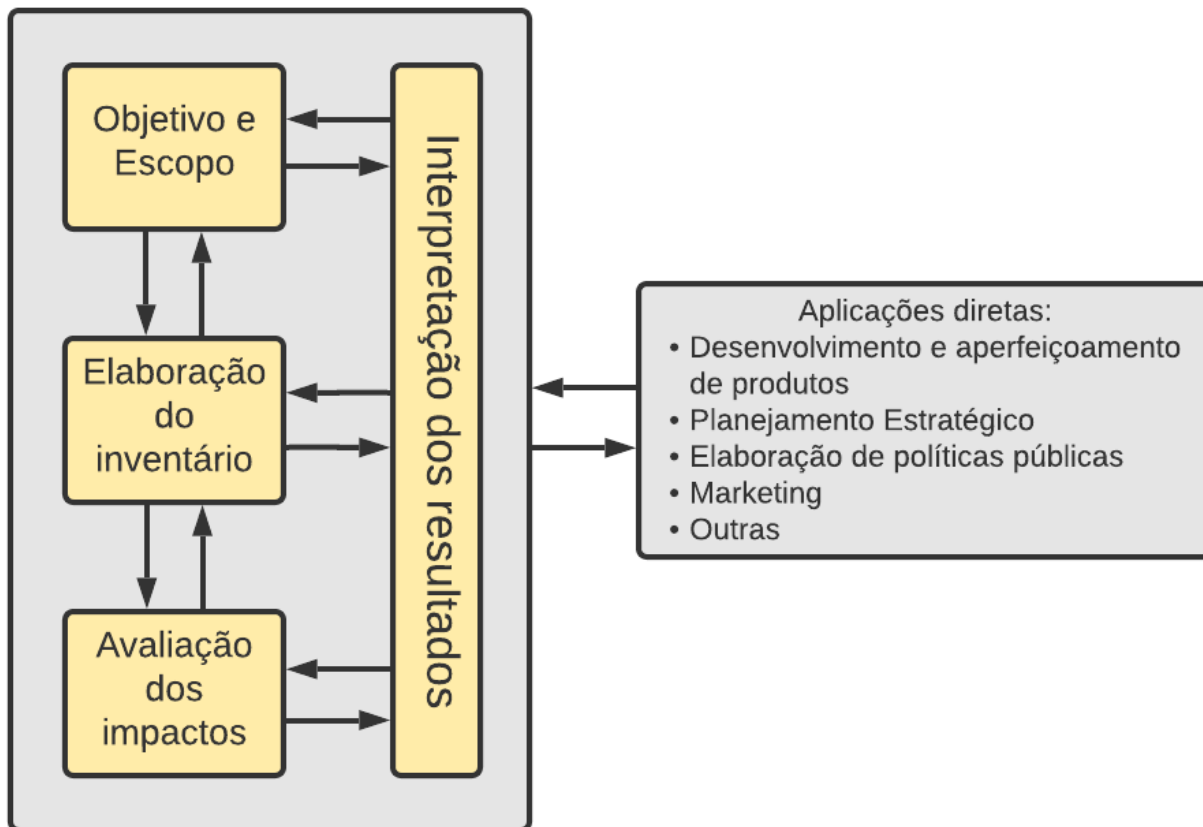
Fonte: autoria própria

2.5.2 Etapas envolvidas na elaboração de um estudo de ACV

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) uma Avaliação do Ciclo de Vida envolve o desenvolvimento de quatro etapas (figura 2.14): (i) objetivo e escopo do estudo, onde são definidas os objetivos e diretrizes do estudo a ser desenvolvido, (ii) análise do inventário, onde são compilados todos os fluxos de entrada e saída dos processos envolvidos no ciclo de vida de um produto ou serviço, (iii) avaliação dos impactos ambientais, consequências diretas

dos fluxos calculados na etapa anterior e (iv) interpretação dos resultados, onde são discutidos os resultados e avaliadas as decisões a serem tomadas.

Figura 2.14: etapas que envolvem uma Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: adaptado de ABNT (2009a)

É importante mencionar que a realização de um estudo de ACV se dá quase sempre de modo iterativo, o que significa dizer que os dados definidos na primeira etapa do estudo podem ser modificados no decorrer do processo, à medida que as informações nas fases do inventário e de avaliação do impacto forem surgindo e até que o estudo alcance um nível de completude e precisão adequados (IBICT, 2014).

2.5.2.1 Definição do objetivo e escopo

Para que os resultados de uma ACV reflitam exatamente aquilo que está sendo estudado, é de extrema importância que as informações sejam definidas sem que haja conflitos de entendimento (CLIFT; DOIG; FINNVEDEN, 2000). Segundo a NBR 14040 (ABNT, 2009a) a fase de definição do objetivo e escopo busca levantar as metas a serem alcançadas em um estudo de ACV, e estas envolvem descrever a aplicação pretendida, as razões por trás da

realização do estudo, o público-alvo ao qual é destinado o estudo e se existe a intenção por parte dos aplicadores da pesquisa de utilizar os resultados em afirmações comparativas.

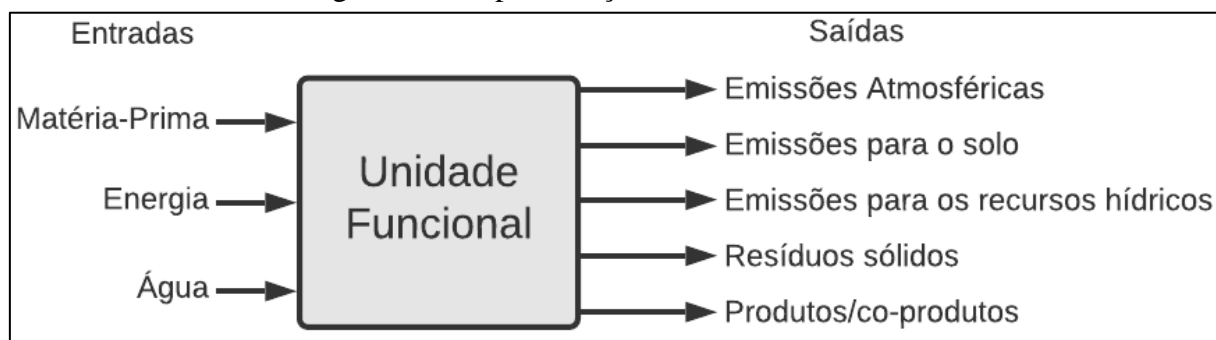
Segundo o IBICT (2014), a definição do objetivo é decisiva para as outras etapas do ACV, uma vez que serve de parâmetro para a definição do escopo que, por sua vez, orienta a estrutura para as etapas de ICV e AICV. A clareza dos dados inseridos nesta fase garante que os produtos de estudo da ACV não sejam erroneamente interpretados. Além disso, o controle de qualidade da avaliação é realizado com base em requisitos definidos nesta etapa.

Definidos os objetivos, a análise segue para a definição do escopo. A NBR 14040 (ABNT, 2009a) orienta que essa etapa seja bem definida, de modo que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo estejam em sintonia e sejam suficientes para atender o objetivo declarado.

O escopo inclui a definição dos limites do estudo dentro do sistema do produto. O sistema do produto é composto por processos elementares que se ligam uns aos outros. A composição do sistema em processos facilita a identificação das entradas e saídas do sistema. Os limites (fronteira dos sistema), por sua vez, servem para delimitar quais processos elementares serão incluídos e quantificados no estudo (ABNT, 2009a). Rosado (2015) destaca a necessidade da criação de um fluxograma de processos que esclareça quais processos estão inclusos na análise e como se dá a relação entre cada um deles. Em estudos comparativos, é comum considerar somente os processos que diferem entre um sistema e outro, o que simplifica a segunda fase, uma vez que os dados a serem levantados diminuem consideravelmente (CLIFT; DOIG; FINNVEDEN, 2000).

No escopo também são definidos a função do sistema, unidade funcional e os fluxos de referência. Um sistema pode possuir várias funções, a depender de quais foram selecionadas no objetivo do ACV. A unidade funcional (figura 2.15) expressa a quantificação das funções. Os impactos referentes ao sistema também são quantificados em relação à unidade funcional escolhida. Os fluxos de referência, por sua vez, quantificam os produtos necessários para desempenhar a função (ABNT, 2009a).

Figura 2.15: representação da unidade funcional



Fonte: adaptado de Chang e Masanet (2014) *apud* Rosado (2015)

Outros itens também são definidos no escopo do estudo de ACV (ABNT, 2009a; DELBIANCO, 2018):

- a) Procedimentos de alocação;
- b) Metodologias para avaliação dos impactos e categorias de impacto envolvidas;
- c) Requisitos dos dados;
- d) Suposições;
- e) Limitações;
- f) Requisitos de qualidade;
- g) Tipo de análise crítica, se aplicável;
- h) Tipo e formato de relatório de apresentação dos resultados.

2.5.2.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida

A análise do inventário consiste na coleta de dados e nos procedimentos de cálculo que quantificam as entradas e saídas relevantes de um sistema do produto. O caráter iterativo atribuído ao estudo de ACV permite que nesta etapa os dados sejam constantemente atualizados, uma vez que se amplia o conhecimento sobre o funcionamento do sistema ou se dá a inserção de novos requisitos ou limitações. Além disso, podem ser definidos condições que obriguem uma revisão do objetivo e escopo, causando mudanças na etapa anterior (ABNT, 2009a).

A NBR 14044 (ABNT, 2009b) destaca duas etapas importantes relativas a compilação dos dados do inventário: coleta de dados e procedimentos de cálculo.

A coleta de dados envolve a obtenção dos dados de entrada e saída de cada um dos processos elementares inclusos na fronteira do sistema (ABNT, 2009b). Estes dados podem ser primários e secundários. Os primários referem-se a dados que foram coletados diretamente com

os operadores dos processos e/ou serviços a serem analisados. Os secundários são obtidos através de bancos de dados, consultores ou grupos de pesquisa que se propuseram a coletar essas informações e documentar (IBICT, 2014). A NBR 14044 (ABNT, 2009b) orienta o referenciamento e descrição do processo de coleta de dados, além da indicação do local e período em que o dado foi obtido.

Os bancos de dados surgiram na década de 80, a partir de iniciativas de grupos universitários e órgãos ambientais de países como Suíça, Alemanha e Suécia. Neste meio, destaca-se o banco de dados do *Ecoinvent*, que possui mais de 4.000 processos elementares nas áreas de energia, transporte, gestão de resíduos, entre outras. Estes dados, por serem padronizados de acordo com a norma ISO/TS 14048 (2002), podem ser carregados em diversos *softwares* de ACV disponíveis no mercado (ARAUJO, 2013).

Os procedimentos de cálculo envolvem a validação dos dados obtidos, a correlação destes aos processos elementares e à unidade funcional definida, além do refinamento do sistema, considerando o caráter iterativo do processo (ABNT, 2009b).

Em caso de sistemas que gerem mais de um tipo de produto, os procedimentos de alocação devem ser adotados. A alocação consiste na divisão adequada dos fluxos de entrada e saída de um sistema do produto entre todos os produtos gerados pelo sistema (ABNT, 2009a). Um exemplo dado por Ramírez (2009) ilustra bem esta realidade: no estudo do ciclo de vida da gasolina, o processo de fracionamento não pode ser totalmente atribuído a gasolina, uma vez que ela não é o único produto gerado no processo de fracionamento. Portanto, para este processo, deve-se encontrar uma forma de calcular as entradas e saídas que correspondam apenas ao produto gasolina.

2.5.2.3 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

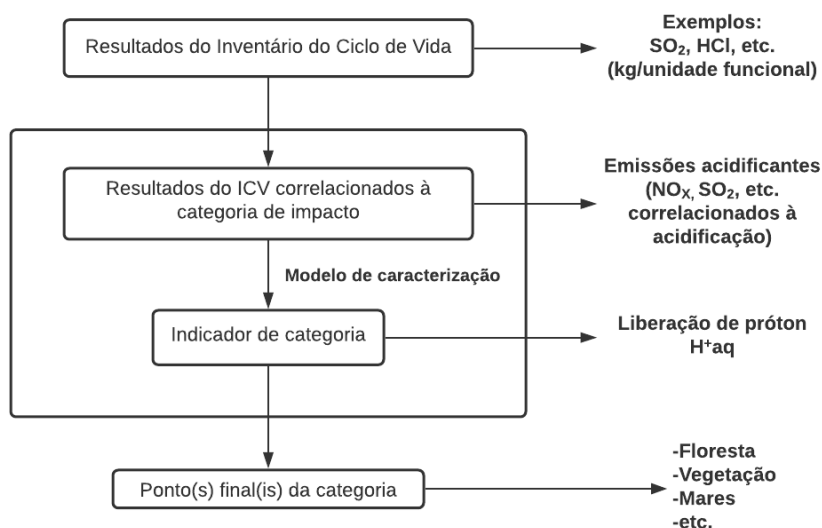
Esta fase do estudo tem como objetivo estudar a magnitude dos impactos ambientais relativos a um dado sistema. Os dados compilados na fase anterior são associados a diversas categorias de impacto que, através de um fator de caracterização, converte os fluxos em indicadores ambientais. A AICV possui elementos obrigatórios (ou mandatórios) e os elementos opcionais (ABNT, 2009a, 2009b).

Os elementos mandatórios constituem os itens que são obrigatórios em qualquer análise de impacto. Os seguintes itens compõem este conjunto (ABNT, 2009b):

- a) Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização: as categorias de impacto devem refletir as questões ambientais relacionados ao sistema do produto. Os indicadores são os valores quantificáveis de impacto ambiental para uma categoria de impacto. Os modelos de caracterização, por sua vez, são úteis para descrever a relação existente entre os resultados do ICV e os indicadores de categoria de impacto selecionadas. Eles são utilizados para gerar os fatores de caracterização. A norma afirma que, na maioria das vezes, são selecionados modelos de caracterização, categorias de impactos e indicadores já existentes, devendo o estudo fazer a devida referência;
- b) Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas: os resultados obtidos no ICV são associados às categorias de impactos escolhidas. Deve-se correlacionar os resultados do ICV que são exclusivos para uma dada categoria ou mesmo identificar os resultados que se relacionam a mais de uma categoria de impacto;
- c) Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria: envolve a conversão dos resultados do ICV para unidades comuns dentro de uma categoria de impacto. O método de cálculo depende do modelo de caracterização a ser escolhido.

A figura 2.16 ilustra de forma simples a relação entre os itens acima descritos. Os resultados gerados no inventário são correlacionados a uma categoria de impacto ambiental (acidificação usada como exemplo). Através de um modelo de caracterização, os itens do inventário relativos à acidificação (NO_x , SO_2 , etc.) são convertidos em indicadores de impacto (item do inventário multiplicado pelo fator de caracterização).

Figura 2.16: elementos obrigatórios em uma AICV



Fonte: adaptado de ABNT (2009b)

Os modelos de caracterização são classificados de duas formas distintas: a) o método clássico, que restringe a modelagem a estágios iniciais, agrupando os dados do ICV em categorias de impacto de *midpoint*; b) métodos orientados ao dano, que modelam os impactos ambientais até o ponto final do dano (*endpoint*). As categorias de impacto *midpoint* referem-se a fluxos elementares que contribuem a um mesmo impacto. Por outro lado, as categorias de impacto do tipo *endpoint* reúnem diversas categorias de impacto *midpoint* que contribuem a um dano específico. A categoria de impacto *Human Health* (saúde humana), do tipo *endpoint*, por exemplo, reúne várias categorias de *midpoint* - toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante, depleção da camada de ozônio e oxidação fotoquímica (JOLLIET et al., 2003).

Além dos itens mandatórios, a AICV pode também ser constituída por elementos opcionais: normalização, agrupamento, ponderação e análise da qualidade dos dados (ABNT, 2009b).

A normalização corresponde ao cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria em relação a alguma informação de referência (fator de normalização) que convertem os indicadores de impactos em novos números, dentro de uma mesma escala, o que permite fazer comparações entre categorias (ABNT, 2009b).

A ponderação é o processo de conversão dos resultados de indicadores de diferentes categorias de impacto pela utilização de fatores numéricos baseados em escolha de valores, atribuindo pesos as categorias de impacto, destacando os graus de importância de cada uma dessas categorias (ABNT, 2009b; ROSADO, 2015).

O agrupamento consiste na reunião de categorias de impacto em um ou mais conjuntos, conforme pré-definido no objetivo e escopo. Busca agrupar as categorias em características (escalas espaciais globais, regionais ou locais, por exemplo) ou por hierarquia (prioridade alta, média ou baixa) (ABNT, 2009b).

Quanto à análise de qualidade dos dados, a norma especifica técnicas que podem ser necessárias para melhor compreender a significância, incerteza e sensibilidade dos dados de AICV. Existem, portanto, três técnicas para atingir esse fim (ABNT, 2009b):

- a) Análise de contribuição, que identifica os dados que possuem maior relevância nos resultados do indicador. A análise de Pareto é um exemplo destinado a esse objetivo;

- b) Análise de incerteza: procedimento que indica como as incertezas envolvidas podem afetar a confiabilidade dos resultados da AICV;
- c) Análise de sensibilidade: procedimento que mostra como a variação nos dados e nas escolhas metodológicas pode afetar os resultados da AICV.

2.5.2.4 Interpretação dos resultados

A interpretação do ciclo de vida é a fase onde as constatações feitas na análise do inventário e na avaliação dos impactos são consideradas em conjunto. Esta fase envolve a identificação das questões significativas do estudo (questões que mais influenciam no processo), avaliação geral do estudo, considerando verificações de completeza, sensibilidade e consistência e, por último, as conclusões, limitações e recomendações (ABNT, 2009a, 2009b).

A NBR 14040 (ABNT, 2009a) destaca que esta fase deve estar em sintonia com o objetivo e escopo. Além disso, na interpretação é possível ainda analisar e revisar o escopo da ACV e avaliar a natureza e qualidade dos dados, de modo a convergir com o objetivo anteriormente definido.

2.6 Avaliação do Ciclo de Vida no contexto dos Resíduos de Construção Civil

A aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na construção civil possui muitas vertentes. Uma delas é estudar os impactos ambientais envolvidos no gerenciamento de resíduos da construção civil (RCC). Mas apesar da difusão dos resíduos da construção e sua utilização no mercado, as consequências disso para o meio ambiente têm sido pouco abordadas (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2015). Yazdanbakhsh (2018) mostra que os estudos nesse campo envolvem, geralmente: (i) comparar os impactos ambientais decorrentes da produção de agregado natural e da produção de agregado reciclado, (ii) comparar os impactos ambientais da produção de concreto com 100% de agregado natural e concreto com substituição parcial de agregado natural por reciclado e (iii) comparar a disposição de RCC em aterro sanitário com o processamento do resíduo em usinas de reciclagem, com uso posterior do agregado para construção de estradas.

Justificado pela diminuição dos pontos de destinação final de RCC na cidade de Hong Kong, Hossain et al. (2016) realizaram um estudo para avaliar os ganhos ambientais decorrentes da produção de agregado reciclado. Através do método de avaliação IMPACT 2002+, que

possui 15 indicadores de *midpoint* e 4 indicadores de *endpoint*, os autores concluíram que a produção de agregado reciclado reduziu a emissão de gases do efeito estufa em 65%, se comparado com a produção de agregado natural, além de uma redução em 58% no uso de energia não-renovável. Resultados semelhantes foram encontrados por Ghanbari, Abbasi, Ravanshadnia (2018), que obtiveram 72% de redução na emissão de CO₂ para a realidade iraniana e por Simion et al. (2013) que constatou uma redução de 60% nos impactos por conta da produção de agregado reciclado na Itália.

Alguns estudos também analisaram a viabilidade da substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado (GHANBARI; ABBASI; RAVANSHADNIA, 2017a, 2017b, 2018). Os autores identificaram uma taxa ótima de substituição em torno de 50% e uma redução nas emissões de CO₂ em torno de 36%, se comparado com a produção de agregado natural.

Outros estudos se voltam para análise do ciclo de vida relativos ao gerenciamento dos resíduos da construção em diversos locais pelo mundo, principalmente em países europeus e asiáticos. A Itália, por exemplo, apresenta uma grande diversidade de trabalhos publicados nesta temática: Blengini e Garbarino (2010) analisaram o sistema de reciclagem de RCC da região de Torino e constataram que os impactos evitados são superiores aos impactos induzidos pelo funcionamento do sistema. Entretanto, os autores destacam que uma atenção especial deve ser dada ao transporte, uma vez que grandes distâncias podem comprometer o desempenho ambiental do sistema como um todo. Borghi, Pantini, Rigamonti (2018), por sua vez, avaliaram o sistema de reciclagem existente na região da Lombardia e, ao contrário daquilo que foi mostrado pelo estudo anterior, os impactos ambientais induzidos pelo sistema são maiores que os benefícios obtidos. No entanto, o sistema apresentou um desempenho melhor do que o cenário onde todo o RCC é enviado para disposição final em aterro sanitário. Através da análise de sensibilidade, os autores propuseram melhorias para o sistema, de modo a otimizar os parâmetros responsáveis pelos maiores impactos ambientais.

Ortiz, Pasqualino e Castells (2010) fizeram a comparação de três cenários distintos para o gerenciamento de resíduos de construção na Espanha: disposição em aterro, reciclagem e incineração. Os resultados colocam em evidência a preferência pela reciclagem na categoria aquecimento global, seguido de incineração e disposição em aterro sanitário, mesmo para usinas de reciclagem situadas a longas distâncias do canteiro de obras. Em outro estudo de comparação de cenários, os resultados foram semelhantes, indicando benefícios ambientais no processo de reciclagem (MAH; FUJIWARA; HO, 2017). Além disso, os mesmos autores do estudo anterior

estimaram que o funcionamento de aterros por longos períodos de tempo pode incrementar os impactos ambientais em até 20%. Por outro lado, a reciclagem pode reduzir os impactos em taxas que variam de 46% a 82%, a depender da distância de transporte do resíduo (MAH; FUJIWARA; HO, 2018).

A triagem de resíduos da construção, juntamente com os processos de transporte, também pode apresentar consequências nos impactos totais de um sistema de gestão de resíduos. Algumas pesquisas avaliaram esse processo e destacaram os elevados impactos ambientais quando se realiza o processo de triagem do RCC fora do canteiro de obras (HOSSAIN; WU; POON, 2017; MERCANTE et al., 2012). Isso pode ser mitigado por meio da separação e classificação dos resíduos ainda em canteiros de obras, o que diminuiria o tempo de uso de máquinas que consomem diesel na usina (MERCANTE et al., 2012). A implantação de usinas móveis dentro dos canteiros de obras pode ser um fator que solucione o problema da triagem e transporte: um estudo de Li et al. (2020) sugere que a implantação de serviços desse tipo diminui os impactos relativos à ocupação de terra e elimina a possibilidade de se utilizar o processo de transporte de resíduos para uma usina de planta fixa.

No Brasil, trabalhos de Avaliação do Ciclo de Vida no contexto dos resíduos de construção ainda são incipientes. Tentativas no sentido de mudar esta realidade são vistas geralmente no Estado de São Paulo, que constataram o grande problema do transporte para o gerenciamento do RCC no Brasil. Penteado e Rosado (2016) concluíram que a reciclagem é mais benéfica que a disposição em aterro somente se a distância entre o gerador e o local de reciclagem não ultrapassar os 30 km. Outro estudo comparou a produção de agregado natural e reciclado para uso em pavimentação, indicando que a reciclagem é benéfica somente se a distância entre a produção e o consumidor não ultrapassar os 20 km. Além desses, outro estudo recomenda a priorização de práticas de redução de resíduos na fonte geradora (ROSADO; PENTEADO, 2019). Rosado et al. (2019), ao realizarem uma ACV do gerenciamento de RCC, incluíram no sistema do produto a reciclagem de resíduos classe B e obtiveram resultados satisfatórios de ganhos ambientais devido à não produção de materiais como aço, vidro e plásticos.

Pode-se perceber desse apanhado de estudos que os resultados variam. Existem casos onde a reciclagem é benéfica. Em outros, a magnitude dos resultados em alguns dos processos inviabiliza a reciclagem. Nesse sentido, as avaliações devem ser conduzidas para se avaliar o melhor cenário, sempre levando em conta as particularidades da região de estudo e as partes

interessadas, incorporando os impactos oriundos da atividade de demolição, transporte de materiais e os benefícios ambientais envolvidos por se evitar a produção de materiais de construção (COELHO; BRITO, 2013a). A análise de sensibilidade têm sido uma forma de estimar até que ponto uma alternativa é melhor que outra. Exemplo disso é o estudo conduzido por Coelho e Brito (2013b) que utilizaram deste recurso, variando parâmetros (capacidade de usina, quantidade de resíduos processada, distância de transporte) e analisando o quanto esta variação interfere nos valores de impacto ambiental. Para este caso específico, constatou-se que os impactos gerados estão associados à transporte e operação e que são menores, se comparados com os impactos evitados.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo serão descritas as características gerais da pesquisa, a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e o delineamento do trabalho, com as etapas necessárias para a realização do estudo de Avaliação do Ciclo de Vida.

3.1 Características Gerais

Provdanov e Freitas (2013) pontuam que a pesquisa científica, uma vez que se dedica a conhecer um ou mais aspectos de determinado assunto, deve ser sistemática, metódica e crítica. Para Zanella (2017), a forma que se desenvolve os procedimentos metodológicos na pesquisa é resultado da maneira pela qual são feitos os questionamentos dos fatos e fenômenos que ocorrem no cotidiano. Sendo assim, existem muitas formas de se planejar os métodos de uma pesquisa. Cada um desses caminhos possuem um conjunto comum de procedimentos e peculiaridades próprias (PROVDANOV; FREITAS, 2013).

A classificação de uma pesquisa científica é feita de quatro maneiras diferentes (PROVDANOV e FREITAS, 2013; ZANELLA, 2017): quanto à natureza, quanto aos objetivos, quanto à abordagem e quanto aos procedimentos adotados na coleta de dados.

Com base nessas informações, buscou-se verificar o enquadramento metodológico na qual esta pesquisa se encontra. Quanto à natureza, pode-se afirmar que se trata de uma pesquisa aplicada, pois busca usar um conhecimento científico consolidado para resolução de problemas. Quanto aos objetivos, a pesquisa é classificada como sendo exploratória, pois tem como meta ampliar o conhecimento a respeito de um determinado fenômeno ou situação. Quanto à abordagem, afirma-se que se trata de uma pesquisa quantitativa, pois o pesquisador busca medir relações entre variáveis, além de medir e quantificar os resultados da investigação. Quanto aos procedimentos adotados na coleta de dados, trata-se de uma pesquisa documental, pois as informações necessárias para a investigação serão obtidas a partir de fontes de dados secundários.

3.2 Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

A realização de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) teve como objetivo principal mapear e extrair dados e informações dos artigos que possuíam como temática a realização de estudos de avaliação do ciclo de vida no contexto do gerenciamento e beneficiamento de resíduos da construção civil. De modo geral, a RSL é um tipo de revisão realizada de forma planejada, de modo que possa ser reproduzida por qualquer pesquisador (GALVÃO; RICARTE, 2019). Ela consiste em avaliar, resumir e comunicar resultados e implicações sobre um determinado assunto disponível na literatura (GREEN, 2005), além de reduzir vieses que ocorrem em uma revisão não-sistemática (SOUSA; RIBEIRO, 2009).

Tendo isso em vista, a RSL foi realizada com o auxílio do software *State of the Art by Systematic Review* (StArt), através de seis etapas: pesquisa exploratória, determinação das palavras-chaves, elaboração do protocolo de pesquisa, busca nas bases de dados, seleção dos artigos e extração dos dados.

A pesquisa exploratória consiste em uma busca livre em periódicos, com o objetivo de se obter uma visão geral sobre a realização de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida no contexto do gerenciamento de resíduos de construção civil. A partir da leitura de alguns artigos, é possível determinar as palavras-chaves e sinônimos mais recorrentes para esta temática, entrando na segunda etapa. Portanto, foram utilizadas nesta RSL as seguintes palavras-chaves: “C&D Waste”, “Construction and Demolition Waste”, “C&DW”, “CDW Recycling”, “Construction Waste”, “LCA”, “LCI”, “Life Cycle Assessment”, “Life Cycle Inventory”.

Em seguida, na terceira etapa, se dá a elaboração do protocolo de pesquisa. É este item que permite a reprodutibilidade da RSL por qualquer pesquisador. Nesta etapa é definido o objetivo da RSL, a questão de pesquisa, o registro das palavras-chaves e sinônimos, definição do idioma (escolheu-se o inglês, por conta de sua universalidade e abrangência), escolha das bases de dados a serem mapeadas, elaboração dos critérios de exclusão, além da escolha das *strings* (combinação das palavras-chaves para busca nas bases de dados) e determinação dos dados a serem extraídos.

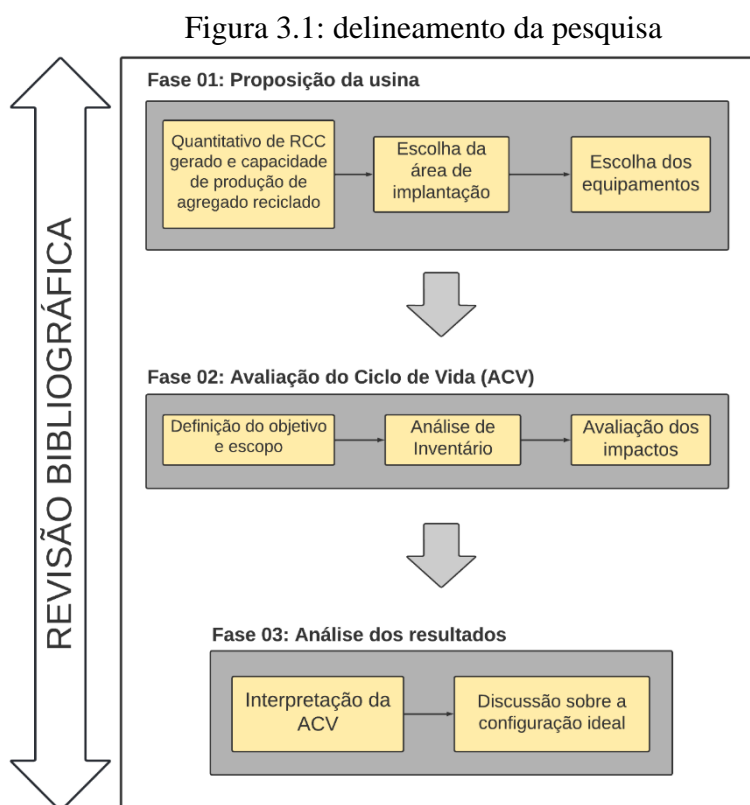
Na quarta etapa acontece a busca dos artigos nas bases de dados definidas na etapa anterior. Para este estudo, foram definidas as seguintes bases: *Engineering Village*, *Web of Science*, *Science Direct*, *Springer* e *EBSCO*. A seguinte *String* foi utilizada nesta etapa: (“construction and demolition waste” OR “construction waste” OR “CDW recycling” OR

"C&DW" OR "C&D waste") AND ("life cycle assessment" OR "LCA" OR "life cycle inventory" OR "LCI"). Feita a busca, os artigos foram selecionados e exportados em formato BIBTEX para o software StArt.

A etapa de seleção consiste em um primeiro filtro, onde é feita a leitura do título, resumo e palavras-chave de cada um dos artigos importados das bases de dados e aplicados os critérios de exclusão que foram definidos no protocolo de pesquisa: (i) artigos com duas páginas ou menos, (ii) artigos de conferências ou capítulo de livros, (iii) artigos onde o resumo não esteja em inglês, (iv) artigos onde a relação entre ACV e RCC não sejam a temática principal, (v) artigos onde a publicação não esteja disponível para acesso, (vi) artigos de revisão e (vii) artigos publicados nos últimos 15 anos. A etapa de extração é onde se faz a leitura completa dos artigos que passaram na fase anterior, sendo aplicado novamente os critérios de exclusão, além da extração das informações definidas no protocolo de pesquisa.

3.3 Delineamento da pesquisa

O delineamento deste trabalho está mostrado na figura 3.1. Todas as fases do estudo serão descritas nos próximos itens.



Fonte: autoria própria.

3.3.1 Fase 01: Proposição da usina

Esta fase consiste em definir todos os parâmetros necessários para se implantar uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil na Região Metropolitana de Belém, sendo composta de três etapas: (i) determinação do quantitativo de RCC gerado na Região Metropolitana de Belém e definição da capacidade de produção da usina; (ii) escolha da área de implantação da usina e (iii) escolha dos equipamentos necessários à operação da usina.

A primeira etapa buscou levantar a quantidade de resíduos gerados por ano na cidade de Belém. Maués, Beltrão, Silva (2021), obtiveram um volume de RCC gerado de cerca de 1244 m³/mês, sendo este valor referência para as etapas posteriores. Para definir a capacidade de produção, será considerado que a usina operará por 21 dias úteis ao mês por um período de 8 horas diárias.

Na segunda etapa buscou-se estabelecer o local de implantação da usina de reciclagem de RCC. Primeiramente, se determinou o tamanho da área necessária para a operação da usina, considerando o trabalho de Jadovski (2005) que estabeleceu uma relação entre a capacidade de produção da usina e a área necessária (tabela 3.1). Determinado o valor da área, foi escolhido um terreno que atenda as diretrizes da NBR 15114 (ABNT, 2004d) e que possuía a área requerida para operação.

Tabela 3.1: área necessária para a usina de reciclagem

Capacidade de Produção (t/h)	Área requerida (m²)
10	5.000
20	6.500
30	8.000
40	10.000
50	12.000
75	16.000
100	20.000

Fonte: adaptado de Jadovski (2005)

Na terceira etapa foram definidos os equipamentos a serem adquiridos para o beneficiamento do resíduo de construção. Geralmente, as usinas de reciclagem operam com os seguintes itens: esteira de triagem, alimentador vibratório, britador e peneira vibratória (ROSADO et al., 2017), sendo estes equipamentos adotados para este caso. Para esta etapa,

portanto, foi realizada a escolha dos equipamentos relativos à especificação (consumo de energia).

3.3.2 Fase 02: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

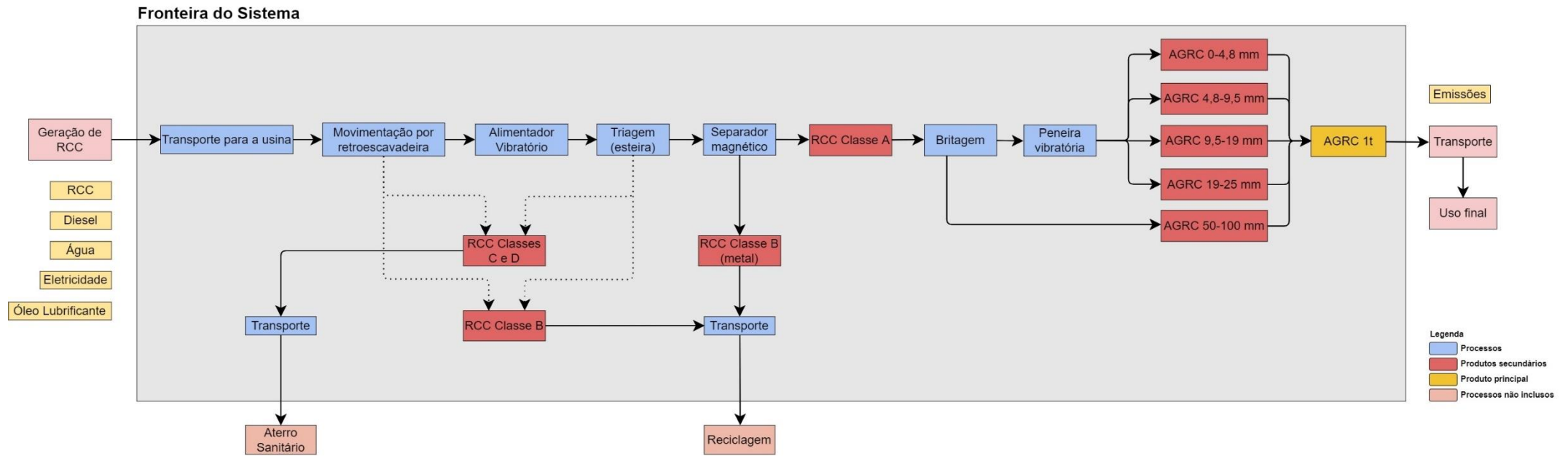
Para se medir os impactos ambientais decorrentes da operação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil, é necessário realizar o estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Dessa forma, o estudo deve seguir as diretrizes estabelecidas pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR 14044 (ABNT, 2009b), que dividem a análise em quatro etapas: (i) Definição do objetivo e escopo; (ii) Análise do inventário do ciclo de vida; (iii) Avaliação de impacto e (iv) interpretação dos resultados. Esta última etapa será discutida em uma fase à parte, juntamente com as discussões a respeito da configuração que melhor se encaixa à realidade da região.

3.3.2.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo principal desta análise é verificar os impactos ambientais relativos à operação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil na Região Metropolitana de Belém, Estado do Pará. A ausência de usinas de reciclagem desse tipo na região e em toda a Amazônia é uma razão que apoia a realização deste estudo. Além disso, os dados podem servir como parâmetros para o estabelecimento de outras pesquisas nesta temática. O público-alvo é a classe de engenharia envolvida na realização de obras de pequeno, médio e grande porte e o poder público (Estado e Município), responsável pelo estabelecimento das políticas que minimizam os impactos decorrentes do descarte irregular de resíduos sólidos na Região Metropolitana de Belém.

A função do sistema é produzir agregado reciclado proveniente de resíduo da construção, através do beneficiamento em usina de planta fixa. A unidade funcional adotada corresponde a produção de 1 tonelada de agregado reciclado. O sistema do produto, baseado no estudo de Rosado et al. (2017), incluiu todas as etapas para o beneficiamento do resíduo que chega na usina, além do transporte para os pontos de reciclagem do resíduo classe B e do transporte do resíduo classe C e D para disposição em aterro sanitário. A figura 3.2 detalha todas as etapas e as entradas necessárias para a função dada. Foram excluídas da análise o transporte do agregado gerado para o consumidor final, haja vista que o cliente pode comprar este produto na porta da usina, e o uso final deste agregado em obra, por não estar no escopo da análise.

Figura 3.2: sistema do produto



Fonte: autoria própria

3.3.2.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida

A partir do sistema do produto definido na figura 3.2, é possível notar que os processos, basicamente, estão definidos em seis etapas: (i) transporte do resíduo gerado em obra para a usina, (ii) movimentação do resíduo na porta da usina, através do uso de retroescavadeira, (iii) processo de reciclagem de RCC, através do uso de equipamentos movidos à eletricidade, (iv) uso de água para controle de poeira, (v) distância de transporte dos resíduos classe B para a reciclagem e (vi) distância de transporte dos rejeitos (resíduos classes C e D) para aterro sanitário. O quadro 3.1 identifica os dados necessários para obtenção das cargas ambientais de cada um desses processos. Os dados primários correspondem às distâncias de transporte, consumo de eletricidade, consumo de água e tempo de operação da pá carregadeira, enquanto os dados secundários correspondem as emissões que são provenientes da base de dados *Ecoinvent*, versão 3.8 (2021), modelo de sistema *Allocation at point of substitution – unit* e U.S. *Life Cycle Inventory (LCI) Database* (2015).

Quadro 3.1: dados primários e secundários necessários para avaliação dos impactos

Processos	Dados Primários	Dados Secundários	Base de dados	Processo na base de dados
Transporte do RCC para a usina	Distância de transporte	Emissões de transporte	Ecoinvent (2021)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 APOS, U
Movimentação por retroescavadeira	Tempo de operação	Emissões devido à queima de combustível	U.S. LCI (2015)	Loader operation, large, NE-NC/RNA
Reciclagem de RCC	Consumo de eletricidade	Emissões do mix energético da região norte brasileira	Ecoinvent (2021)	Electricity, medium voltage {BR-Northern grid} market for electricity, medium voltage APOS, U
	Consumo de água (controle de poeira)	Emissões devido ao consumo de água	Ecoinvent (2021)	Tap water {BR} market for tap water APOS, U
Transporte do resíduo classe B para reciclagem	Distância de transporte	Emissões de transporte	Ecoinvent (2021)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 APOS, U
Transporte de rejeitos para aterro sanitário (resíduo classes C e D)	Distância de transporte	Emissões de transporte	Ecoinvent (2021)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 APOS, U

Fonte: autoria própria

A NBR 14040 (ABNT, 2009a) ressalta também a importância de se descrever a qualidade dos dados, afirmando que, através desse passo, é possível entender a confiabilidade dos resultados e interpretá-los de forma adequada. Com esse propósito, a Ecoinvent (WEIDEMA et al., 2013) elaborou a matriz pedigree, que avalia a qualidade dos dados de entrada (primários e secundários), atribuindo notas em uma escala de 1 a 5 em cinco indicadores que se referem ao histórico ou origem dos dados (quadro 3.2).

Quadro 3.2: matriz pedigree

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5
Confiabilidade	Dados verificados com base em medições	Dados verificados parcialmente baseados em suposições ou dados não verificados com base em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativa qualificada (por exemplo, por expert industrial)	Estimativa não qualificada
Completeness	Dados representativos de todos os locais relevantes para o mercado considerado, durante um período adequado para equilibrar as flutuações normais	Dados representativos de mais de 50% de locais relevantes para o mercado considerado, durante um período adequado para uniformizar as flutuações normais	Dados representativos de apenas alguns locais (<<50%) relevantes para o mercado considerado ou mais de 50% dos locais, porém de períodos mais curtos	Dados representativos de apenas um local relevante para o mercado considerado ou de alguns locais, mas de períodos mais curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e de períodos mais curtos
Correlação temporal	Menos de três anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados	Menos de seis anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados	Menos de dez anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados	Menos de quinze anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados	Idade dos dados desconhecidos ou mais de quinze anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados
Correlação geográfica	Dados da área de estudo	Dados médios de uma área maior na qual a área em estudo está incluída	Dados da área com condições de produção semelhantes	Dados da área com condições de produção ligeiramente semelhantes	Dados de áreas desconhecidas ou distintamente diferentes
Maior correlação tecnológica	Dados de empresas, processos e materiais em estudo	Dados de processos e materiais em estudo (tecnologia idêntica, mas empresas diferentes)	Dados de processos e materiais em estudo, mas de diferentes tecnologias	Dados sobre processos ou materiais relacionados	Dados sobre processos relacionados em escala laboratorial ou de diferentes tecnologias

Fonte: adaptado de Weidema et al. (2013)

Dessa forma, todos os dados foram classificados, de acordo com os indicadores de qualidade previstos pela matriz pedigree, conforme descrito abaixo:

- Distância de transporte – primário: (2, 4, 1, 1, 1)
- Emissões de transporte – secundário: (1, 2, 1, 2, 2)
- Tempo de operação da pá carregadeira – primário: (1, 1, 1, 1, 4)
- Emissões devido ao uso da pá carregadeira – secundário: (1, 1, 1, 2, 2)
- Consumo de eletricidade – primário: (1, 1, 1, 1, 4);
- Emissões do mix energético da região norte brasileira – secundário: (1, 2, 1, 1, 2);
- Consumo de água – primário: (1, 1, 1, 1, 4)
- Emissões devido ao consumo de água – secundário: (1, 2, 1, 2, 2)

3.3.2.3 Avaliação dos impactos

Esta é a etapa onde as emissões de cada processo de um sistema do produto são convertidas em valores de impacto ambiental, de acordo com os fatores de caracterização definidos pelo método de avaliação de impacto a ser utilizado. Diante da complexidade envolvida nesta etapa da ACV, a utilização de um *software* que esteja associado a uma base de dados se torna necessária. Nesse sentido a modelagem do inventário e, consequentemente, a avaliação dos impactos ambientais desta ACV foram feitas através do uso da ferramenta computacional *SimaPro* 9.3.0. A escolha deste *software* se dá, justamente, por sua integração com a base de dados do *Ecoinvent* 3.8 (2021). Esta, por sua vez, é a base de dados mais recorrente na literatura, como foi constatado pela revisão sistemática realizada.

O método de avaliação de impacto utilizado nesta análise é o Impact 2002+ (JOLLIET et al., 2003), baseando-se no trabalho de Rosado et al. (2017) para fazer uma comparação correta dos resultados. Esta metodologia foi desenvolvida no Instituto Federal de Tecnologia da Suíça, em Lausanne, se formando através da união entre os métodos CML2000, *Eco-indicator* 99, IPCC e demanda de energia acumulada. Possui 15 categorias de impacto (quadro 3.3) com abordagem orientada ao problema (*midpoint*) e 4 categorias de impacto com abordagem orientada ao dano (*endpoint*) (PRÉ SUSTAINABILITY, 2020). As análises realizadas neste trabalho consideraram as categorias de impacto no nível *midpoint*, por mostrarem os impactos como problemas ambientais únicos.

Quadro 3.3: categorias de impacto do método Impact 2002+

Categorias de Impacto (<i>midpoint</i>)	Unidade	Categoria de <i>Endpoint</i> associada
Carcinogênicos	kg C2H3Cl eq	Saúde humana
Não-carcinogênicos	kg C2H3Cl eq	Saúde humana
Respiratórios inorgânicos	kg PM2,5 eq	Saúde humana
Radiação ionizante	Bq C-14 eq	Saúde humana
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	Saúde humana
Respiratórios orgânicos	kg C2H4 eq	Saúde humana
Ecotoxicidade aquática	kg TEG água	Qualidade do ecossistema
Ecotoxicidade terrestre	kg TEG solo	Qualidade do ecossistema
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	Qualidade do ecossistema
Ocupação do solo	m2org.arable	Qualidade do ecossistema
Acidificação aquática	kg SO2 eq	Qualidade do ecossistema
Eutrofização aquática	kg PO4 P-lim	Qualidade do ecossistema
Aquecimento global	kg CO2 eq	Mudanças climáticas
Energia não renovável	MJ primário	Recursos
Extração mineral	MJ excedente	Recursos

Fonte: adaptado de PRé Sustainability (2020).

3.3.3 Fase 03: Análise dos resultados

Nesta fase da pesquisa foram feitas as análises e discussões a respeito dos resultados encontrados nas fases anteriores do estudo. Os resultados, portanto, serviram como suporte à tomada de decisão para escolha da melhor alternativa de gerenciamento de RCC que atenda a Região Metropolitana de Belém, de modo a se obter os menores impactos ambientais.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, será apresentado, primeiramente, os dados relativos ao procedimento de Revisão Sistemática da Literatura, que teve o objetivo de levantar a base bibliográfica referente à aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no contexto do gerenciamento de resíduos da construção civil (RCC). Depois são apresentados os dados relativos ao delineamento da pesquisa: a primeira fase do estudo, onde se faz a proposição da usina de reciclagem de resíduos da construção civil para a Região Metropolitana de Belém; em seguida, os resultados referentes à aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida de operação da futura usina (fase 02), que compreende o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e os impactos ambientais calculados; por último, na fase 03, os resultados obtidos na fase anterior são interpretados e são apresentadas as discussões relativas à configuração ideal, baseada em estudos na literatura que abordaram a temática da ACV no contexto de gerenciamento dos RCC.

4.1 Resultados extraídos da Revisão Sistemática da Literatura

Ao se realizar a Revisão Sistemática da Literatura, foram encontrados 982 artigos nas cinco bases de dados definidas no protocolo de pesquisa. Na etapa de seleção foram aceitos 77 artigos, sendo que 648 foram rejeitados pelos critérios de exclusão e 257 rejeitados por duplicação. Na etapa de extração, foram aceitos 38 artigos, que servem como sistematização de conceitos para o desenvolvimento da pesquisa. Outros 39 artigos foram rejeitados ao se aplicar os critérios de exclusão. Os resultados obtidos para esta fase estão detalhados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: resultados da revisão sistemática

Base	Engineering Village	Web of Science	Springer	Science Direct	EBSCO
Artigos importados	117	201	489	88	87
Total	982				
	Seleção			Extração	
Aceitos	77			38	
Rejeitados	648			39	
Duplicados	257			-	

Fonte: autoria própria.

Com base na RSL, é possível identificar algumas tendências quando se utiliza a estrutura da ACV para avaliar os impactos ambientais decorrentes do gerenciamento de resíduos da construção civil. Primeiramente, os estudos se concentram em três temáticas:

- a) Comparação de cenários de gerenciamento: a avaliação nesse tipo de estudo buscou quantificar os impactos para alguns cenários de gerenciamento de resíduos e determinar as melhores alternativas. Em grande parte dos trabalhos, a reciclagem se mostra mais vantajosa do que alternativas como disposição em aterro e incineração, por exemplo. Trabalhos como os de Ortiz, Pasqualino, Castells (2010), Butera, Christensen, Astrup (2015), Mah, Fujiwara, Ho (2018) e Jain, Singhal, Pandey (2020) são algum dos exemplos nessa temática;
- b) Avaliação do sistema de uma determinada região: aqui os pesquisadores buscaram quantificar os impactos ambientais de sistemas existentes em uma região e propor medidas que minimizassem os prejuízos à natureza. Blengini e Garbarino (2010) realizaram esse tipo de pesquisa na Itália e Rosado e Penteado (2019) avaliaram o sistema de gerenciamento em uma grande bacia hidrográfica no interior do Estado de São Paulo, Brasil;
- c) Comparação entre produção de agregado natural e agregado reciclado: nessa temática, os estudos buscaram comparar que tipo de agregado trazia os menores impactos à natureza – agregado natural e agregado reciclado. A grande maioria dos estudos encontraram ganhos ambientais decorrentes da reciclagem de resíduos da construção, porém com ressalvas quando se considera longas distâncias de transporte. Hossain et al. (2016), Rosado et al. (2017) e Ghanbari, Abbasi, Ravanshadnia (2018) são alguns exemplos nessa temática.

Outra tendência são os métodos de avaliação utilizados para quantificação dos impactos ambientais. Grande parte dos estudos utilizam o Impact 2002+ (JOLLIET et al., 2003) por possuírem categorias que se adequam aos problemas ambientais decorrentes da operação de uma usina de reciclagem. O ReCipe (GOEDKOOOP et al., 2009) também é bastante utilizado pelas mesmas razões.

Em resumo, os estudos extraídos da RSL revelam as potencialidades que a reciclagem dos resíduos da construção possui para evitar grandes impactos ambientais. A ACV deve ser utilizada para tomada de decisão nesses casos, permitindo que se observe a melhor alternativa, pois a depender da forma como o sistema está configurado, os impactos ambientais podem ser

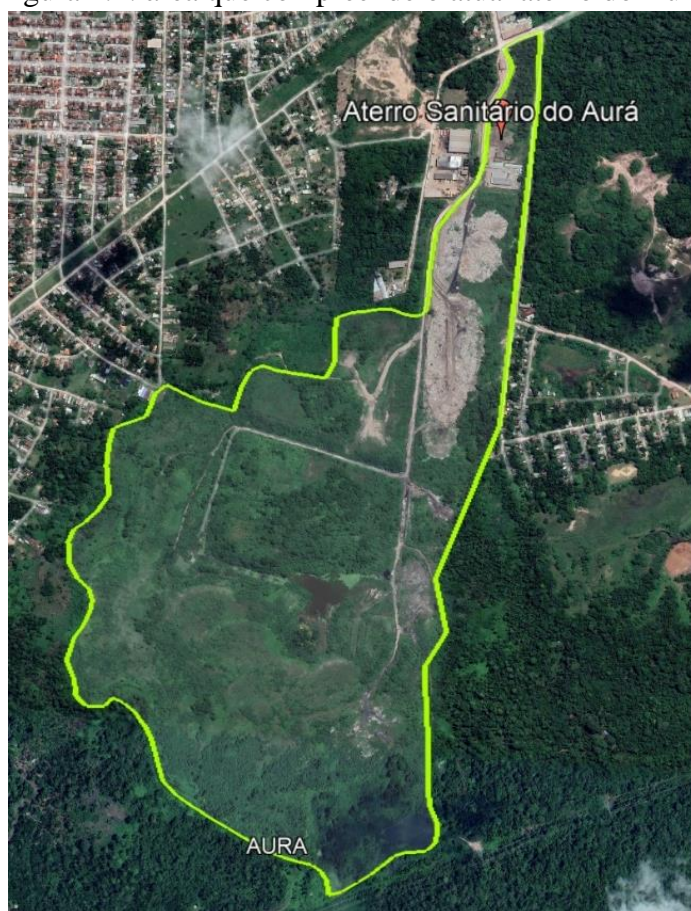
maiores do que outras alternativas de gestão de RCC. Isso porque a maioria dos estudos constataram grandes cargas de impacto ambiental decorrentes dos processos de transporte e triagem, por conta do uso do diesel.

4.2 Fase 01: Proposição da usina

Diante do que já foi visto, este trabalho apresenta a proposta de implantação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil, que atenda a Região Metropolitana de Belém. Desse modo, primeiramente, foi determinado a capacidade de produção da futura usina. Por conta do volume de geração definido na seção 3.3.1, que é de 1244 m³/mês (MAUÉS; BELTRÃO; SILVA, 2021), conclui-se que é necessário que a usina opere com uma capacidade de produção de 9 t/h, para que atenda a quantidade gerada. Esse valor serve como parâmetro para definição dos dados de entrada da ACV, uma vez que os fluxos de entrada são convertidos para a unidade funcional estabelecida (1 t) através da capacidade de produção.

A próxima etapa consiste em escolher o local de implantação da usina de reciclagem. A área escolhida é o Aterro do Aurá (figura 4.1), espaço que já é utilizado para disposição final dos resíduos da construção na cidade de Belém. O local possui cerca de 1.000.000 m², o que atende a capacidade de produção, pois segundo Jadovski (2005), são necessários 5.000 m² de área para se implantar a usina de reciclagem. Além disso, a área deve atender as diretrizes da NBR 15114 (ABNT, 2004d), no que diz respeito a minimização dos impactos ambientais (isso é possível devido aos benefícios ambientais que a reciclagem proporciona, se comparado com a disposição final), a aceitação da população que vive no entorno (através da geração de empregos, melhores condições de saúde e ganhos em infraestrutura) e que esteja de acordo com as legislações de uso de solo e ambiental.

Figura 4.1: área que compreende o atual aterro do Aurá.



Fonte: adaptado de Google Earth (2022).

Quanto aos equipamentos, foram escolhidos aqueles definidos na seção 2.3.3, que são os mesmos utilizados por Rosado et al. (2017) em seu Inventário de Ciclo de Vida, conforme mostra a tabela 4.2.

Tabela 4.2: equipamentos utilizados e potência

Equipamento	Potência (KWh)
Alimentador Vibratório	4,10
Esteira de Triagem	5,59
Correia transportadora – 6 unidades	13,44
Separador Magnético	1,49
Britador	67,11
Peneira Vibratória	8,2
Sistema anti-poeira	3,73
Total	103,66

Fonte: adaptado de Rosado et al. (2017).

4.3 Fase 02: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

4.3.1 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Para obter os impactos ambientais, é necessário quantificar todos os dados necessários de entrada para produção de 1 t de agregado reciclado em uma usina de reciclagem de RCC. Isso consiste no Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Para isso, é necessário analisar processo a processo, dentro daquilo que está considerado no estudo, e verificar as entradas necessárias para quantificação dos impactos.

Primeiramente, são definidos dados de composição gravimétrica dos resíduos da construção, que são importantes para se determinar a quantidade de RCC que deve entrar na usina para produção de 1 t de agregado reciclado, unidade funcional adotada neste estudo. Entretanto, a cidade de Belém não possui dados relativos à composição gravimétrica de RCC gerado. Dessa forma, foram adotados dados de composição obtidos por Rosado e Penteado (2019) para a cidade de Campinas, apoiadas na semelhança populacional entre os dois municípios, conforme mostra a tabela 4.3. Assim, foram obtidos 90% de RCC classe A, 7% de RCC classe B e 3% de RCC classes C e D. Portanto, a quantidade de RCC necessária para produção de 1 t de agregado reciclado é de 1,11 t, conforme detalhado na tabela 4.4.

Tabela 4.3: estimativas populacionais para as cidades de Belém e Campinas

Cidade	População (hab)
Belém – PA	1.506.420
Campinas – SP	1.223.237

Fonte: IBGE (2022)

Tabela 4.4: quantidade de RCC que entra na usina para produção de agregado reciclado

Classes	Porcentagem (%)	Quantidade (t)
A	90	1
B	7	0,08
C	3	0,03
Total	100	1,11

Fonte: adaptado de Rosado e Penteado (2019)

Com os dados de composição gravimétrica, o volume de RCC gerado (definido na seção 3.3.1) e a capacidade de produção da usina (definida na seção 4.2), é possível ajustar os

dados de entrada de cada um dos processos avaliados na ACV para a unidade funcional adotada, como será visto adiante.

4.3.1.1 Processos de transporte

O primeiro processo a ser considerado é o transporte do RCC gerado para a usina de reciclagem. Como dado primário, considera-se a distância de transporte. Sendo assim, foi adotado o valor de 22,81 km, referente a média de distância entre os geradores de RCC e o aterro do Aurá, de acordo com o trabalho de Maués, Beltrão, Silva (2021). Em uma Avaliação do Ciclo de Vida, o transporte é expresso a partir da multiplicação dos fatores quantidade transportada e distância percorrida (fator de transporte, em t.km) (ROSADO, 2015). Portanto, a tabela 4.5 mostra esses valores e o resultado do fator de transporte, sendo este valor utilizado como entrada na modelagem computacional da ACV, para obtenção das emissões e impactos ambientais.

Tabela 4.5: valores de entrada do processo de transporte de RCC para usina

Parâmetros de entrada	Valor
Distância de transporte (km)	22,81
Quantidade transportada (t)	1,11
Fator de transporte (t.km)	25,32

Fonte: autoria própria

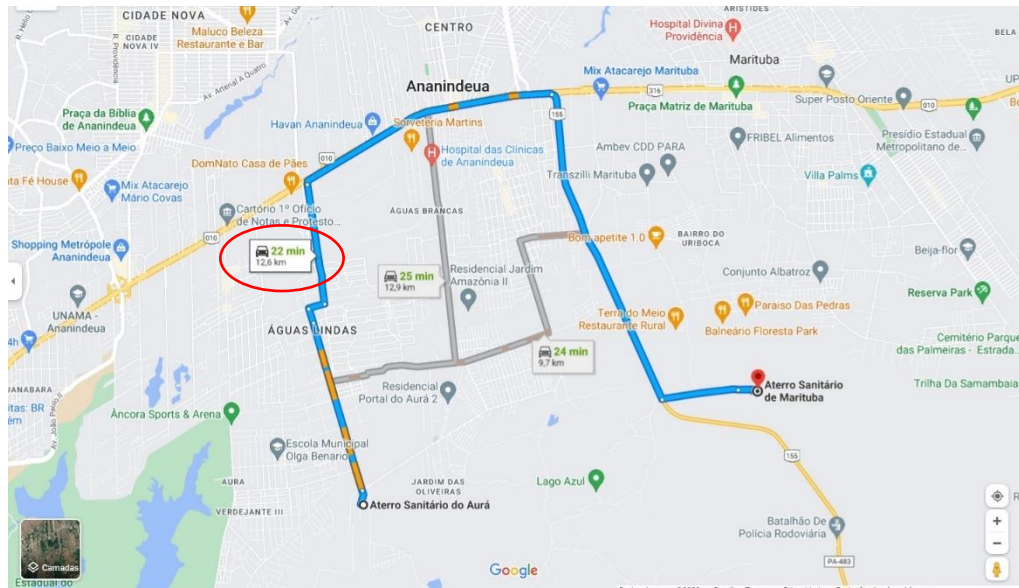
Para os demais processos de transporte contidos no escopo desta análise, a metodologia é semelhante. Para o transporte dos rejeitos à disposição final (RCC classes C e D), considera-se que os mesmos serão depositados no Aterro Sanitário de Marituba, distante 12,6 km do local da usina (figura 4.2). E para o transporte do RCC classe B, considera-se que o resíduo será enviado à uma recicladora privada, distante 11,2 km do local da usina (figura 4.3). As tabelas 4.6 e 4.7 mostram os parâmetros necessários para modelagem destes processos.

Tabela 4.6: valores de entrada do processo de transporte de rejeitos para disposição final

Parâmetros de entrada	Valor
Distância de transporte (km)	12,6
Quantidade transportada (t)	0,03
Fator de transporte (t.km)	0,38

Fonte: autoria própria

Figura 4.2: distância entre futura usina e Aterro Sanitário de Marituba



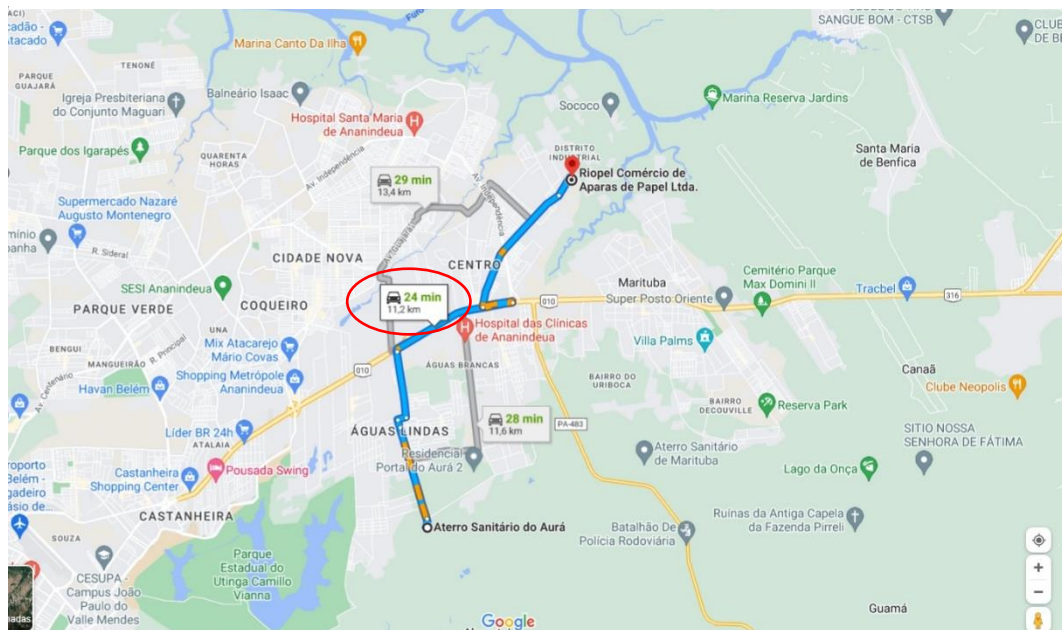
Fonte: Google Maps (2022)

Tabela 4.7: valores de entrada do processo de transporte de RCC classe B para reciclagem

Parâmetros de entrada	Valor
Distância de transporte (km)	11,2
Quantidade transportada (t)	0,08
Fator de transporte (t.km)	0,90

Fonte: autoria própria

Figura 4.3: distância entre futura usina e recicladora privada



Fonte: Google Maps (2022)

Os dados relativos ao processo de transporte são modelados para cálculo dos impactos e emissões através do processo de transporte do Ecoinvent (2021), que considera o transporte de 1 t.km de carga para a realidade brasileira, através de veículos com peso bruto total (PBT) entre 16 e 32 toneladas (ver quadro 3.1 para consulta ao código do processo).

4.3.1.2 Movimentação por retroescavadeira

Este processo corresponde a movimentação do RCC no pátio de recepção da usina. Uma vez que o resíduo chega, é necessário o uso de retroescavadeira para realização de uma primeira triagem para separação dos materiais entre as classes e retirada de grandes materiais que não correspondam a resíduos de construção. O processo possui, como dado de entrada, a quantidade de tempo, em horas, necessária para produção de 1 t de agregado reciclado. Através da capacidade de produção da usina, de 9 t/h, é possível concluir que é necessário 0,11 h de movimentação da retroescavadeira para produção de 1 t de agregado reciclado. Esse dado é utilizado na modelagem para o cálculo das emissões e impactos ambientais, através do processo de operação de retroescavadeira, contido na base de dados U.S LCI (2015), que considera a operação desse tipo de maquinário por um tempo de 1 h (ver quadro 3.1 para consulta ao código do processo).

4.3.1.3 Reciclagem de RCC

Este processo consiste na operação de reciclagem em si, onde o resíduo será triturado em partículas menores e peneirado para divisão em diferentes granulometrias, prontas para serem comercializadas. Para isso, parte do processo possui como dado de entrada o consumo de eletricidade por parte dos equipamentos de reciclagem, que foram selecionados de acordo com Rosado et al. (2017), e que estão apresentados na tabela 4.2. O consumo total de eletricidade por esses equipamentos é de 103,66 KWh. De acordo com a capacidade de produção, o gasto energético para produção de 1 t de agregado reciclado é de 10,94 KWh. Entretanto, Coelho e Brito (2013a) observam que os equipamentos não trabalham de forma contínua, pois ocorrem paradas para carregamento, descarregamento e manutenção, devendo, portanto, ser considerado apenas 70% do consumo energético total para 1 t, o que corresponde a um gasto energético de 7,66 KWh (tabela 4.8).

Para modelagem do processo, o gasto energético foi utilizado como parâmetro de entrada no processo de fornecimento de eletricidade, do Ecoinvent (2021), que considera a

transmissão de 1 KWh de eletricidade para a região norte brasileira (ver quadro 3.1 para consulta do processo).

Tabela 4.8: gasto energético para produção de 1 t de agregado reciclado

Gasto energético que atenda a capacidade da usina (KWh)	103,66
Gasto para produção de 1 t de agregado reciclado (KWh)	10,94
Gasto considerando 70% do consumo total (KWh)	7,66

Fonte: autoria própria

Além de consumir eletricidade, o processo de reciclagem consome água para controle de poeira no processo de britagem. O consumo de água em usinas de reciclagem de RCC é de 250 L/dia (ROSADO et al., 2017), o que gera um consumo de 3,29 kg para cada tonelada de agregado reciclado a ser produzida. O processo utilizado na modelagem é o de consumo de água, do Ecoinvent (2021), que considera o consumo de 1 kg de água (ver quadro 3.1 para consulta do processo).

Determinados todos os dados de inventário, a modelagem foi realizada para quantificação das emissões e dos impactos ambientais envolvidos na operação de reciclagem de uma usina de reciclagem de RCC, com os resultados apresentados a partir da próxima seção.

4.3.2 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

A tabela 4.9 apresenta a contribuição dos processos de reciclagem para cada uma das 15 categorias de impacto avaliadas neste estudo. Os valores em negrito representam os processos com as maiores contribuições na categoria.

Tabela 4.9: contribuição (%) dos processos para os impactos totais de cada categoria

(continua)						
CATEGORIA DE IMPACTO	TRANSP USINA	MOVIM. RETRO	ÁGUA	ELETRICIDADE	TRANSP REJEITOS	TRANSP CLASSE B
Carcinogênicos	36,21%	44,82%	0,33%	16,81%	0,54%	1,29%
Não-carcinogênicos	12,87%	81,68%	0,05%	4,75%	0,19%	0,46%
Respiratórios inorgânicos	14,46%	80,69%	0,02%	4,10%	0,22%	0,51%
Radiação ionizante	79,87%	0,00%	0,05%	16,04%	1,20%	2,84%
Depleção da camada de ozônio	77,09%	0,10%	0,07%	18,84%	1,16%	2,75%
Respiratórios orgânicos	32,64%	61,55%	0,02%	4,14%	0,49%	1,16%
Ecotoxicidade aquática	9,45%	88,97%	0,02%	1,08%	0,14%	0,34%

Tabela 4.9: contribuição (%) dos processos para os impactos totais de cada categoria (conclusão)

CATEGORIA DE IMPACTO	TRANSP USINA	MOVIM. RETRO	ÁGUA	ELETRICIDADE	TRANSP REJEITOS	TRANSP CLASSE B
Ecotoxicidade terrestre	90,01%	0,11%	0,05%	5,28%	1,35%	3,20%
Acidificação terrestre	8,04%	89,00%	0,01%	2,54%	0,12%	0,29%
Ocupação do solo	88,05%	0,00%	0,07%	7,41%	1,33%	3,14%
Acidificação aquática	10,62%	83,59%	0,01%	5,23%	0,16%	0,38%
Eutrofização aquática	67,83%	20,72%	0,32%	7,71%	1,02%	2,41%
Aquecimento global	27,79%	60,40%	0,02%	10,38%	0,42%	0,99%
Energia não renovável	30,14%	60,22%	0,02%	8,10%	0,45%	1,07%
Extração mineral	66,09%	0,00%	0,72%	29,84%	0,99%	2,36%

Fonte: autoria própria.

É possível notar que o processo de utilização de retroescavadeira apresenta impactos ambientais significativos em nove categorias. Conclusões semelhantes foram obtidas em estudos como o de Delbianco (2018) e Rosado et al. (2017), sendo que este último aponta o consumo de diesel como o grande responsável por esses resultados. De fato, a tabela 4.10 aponta que em seis das nove categorias onde o processo de movimentação por retroescavadeira apresentou os maiores impactos, o diesel é o grande responsável pelo impacto ambiental total causado por esse processo.

Tabela 4.10: contribuição do diesel nas categorias onde a movimentação por retroescavadeira causa os maiores impactos ambientais

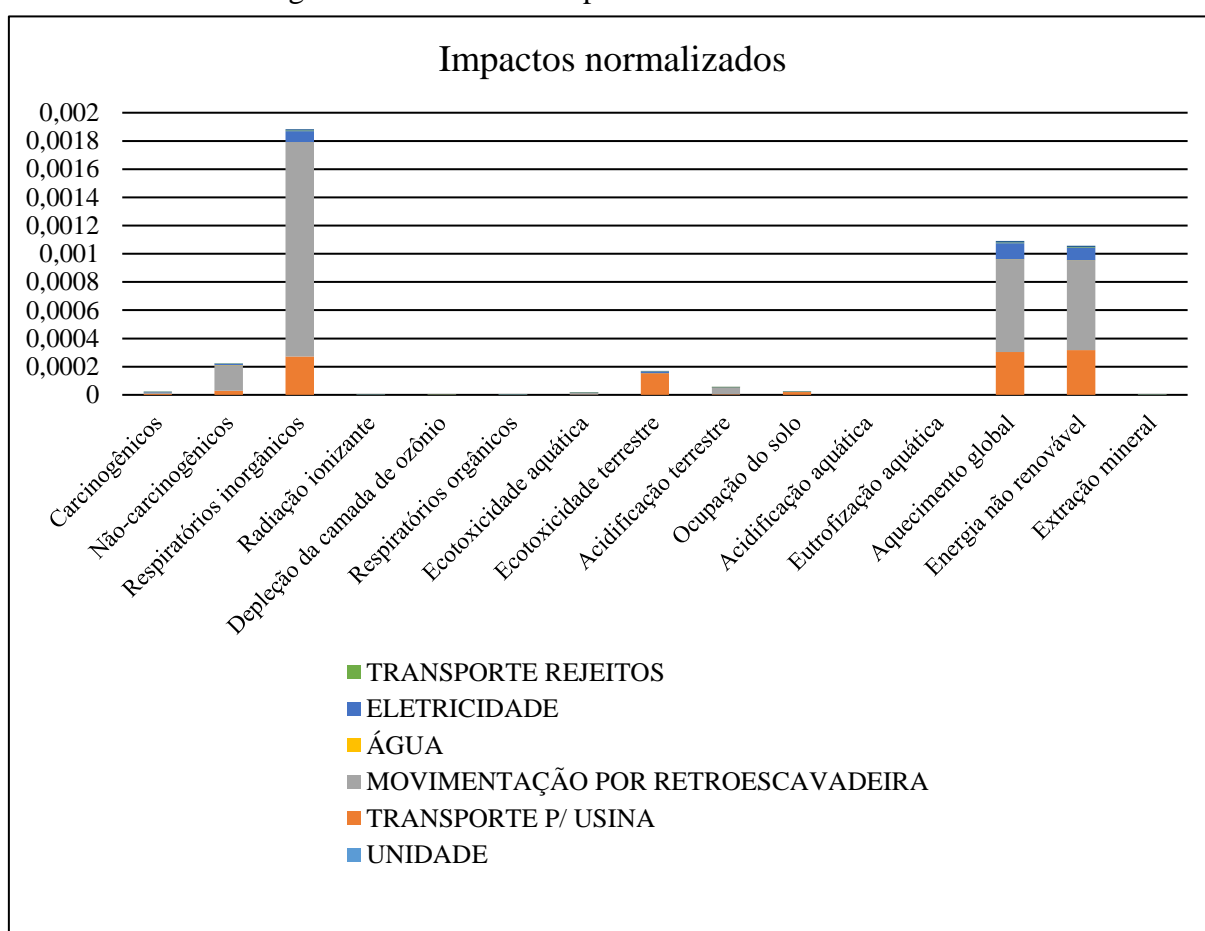
CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL MOVIM RETRO	CONTRIBUIÇÃO DIESEL	%
Carcinogênicos	kg C2H3Cl eq	0,0229	0,0206	90%
Não-carcinogênicos	kg C2H3Cl eq	0,459	0,0046	1%
Respiratórios inorgânicos	kg PM2.5 eq	0,0154	0,014	91%
Respiratórios orgânicos	kg C2H4 eq	0,00364	0,00102	28%
Ecotoxicidade aquática	kg TEG water	3,05E+03	0,0175	0%
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	0,644	0,603	94%
Acidificação aquática	kg SO2 eq	0,0897	0,077	86%
Aquecimento global	kg CO2 eq	6,52	5,69	87%
Energia não renovável	MJ primary	96,7	0	0%

Fonte: autoria própria.

Através da normalização dos impactos, é possível identificar as categorias que apresentam os resultados mais relevantes para o estudo. Deste modo, a figura 4.4 mostra que

os efeitos respiratórios inorgânicos, aquecimento global e energia não-renovável são as categorias de impacto mais relevantes para a análise feita neste estudo. As três categorias, juntas, representam cerca de 89% de todos os impactos ambientais para a usina de reciclagem de RCC. Resultado que se assemelha ao obtido por Rosado et al. (2017), haja vista que foram utilizados os mesmos processos e o mesmo modelo de avaliação de impacto, com poucas limitações. Delbianco (2018), por sua vez, também utilizando a mesma metodologia de avaliação de impacto, obteve em seus resultados um conjunto de categorias que continham as três acima mencionadas, incluindo ecotoxicidade terrestre e impactos não-carcinogênicos.

Figura 4.4: valores de impacto ambiental normalizados

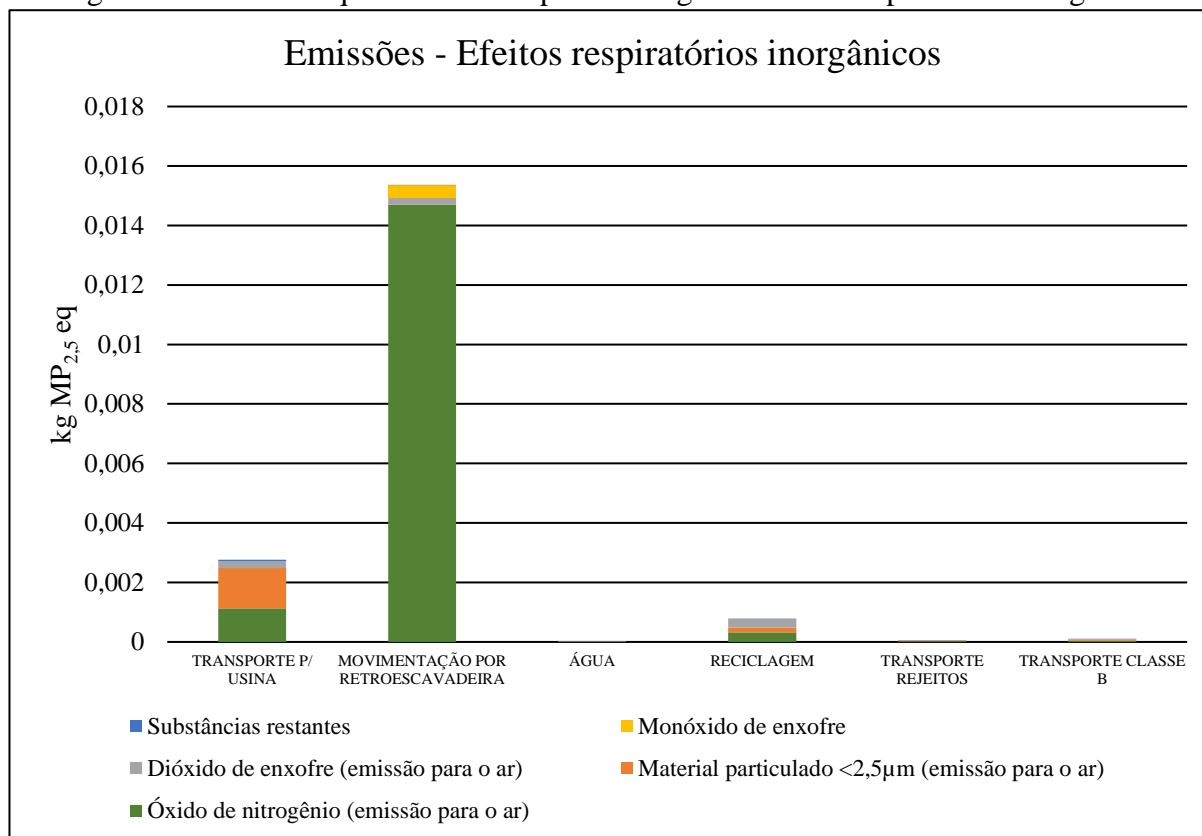


Fonte: autoria própria

A seguir serão detalhados os resultados de análise contribucional para as três categorias que apresentaram os impactos ambientais mais significativos, com o objetivo de evidenciar as emissões e a matéria-prima consumida para cada um dos processos. Para todas as análises, foram considerados apenas as emissões que contribuem com mais de 1% no impacto ambiental da categoria.

Na categoria de efeitos respiratórios inorgânicos (figura 4.5), destacam-se as emissões de óxido de nitrogênio (NO_x) e material particulado ($\text{MP}_{2,5}$), nas etapas de transporte e movimentação por retroescavadeira, devido ao consumo de diesel nestes processos. Esse resultado é corroborado por Villela, Antunes, Silveira (2007), que destaca a emissão desses elementos por conta do consumo de diesel por caminhões e retroescavadeiras.

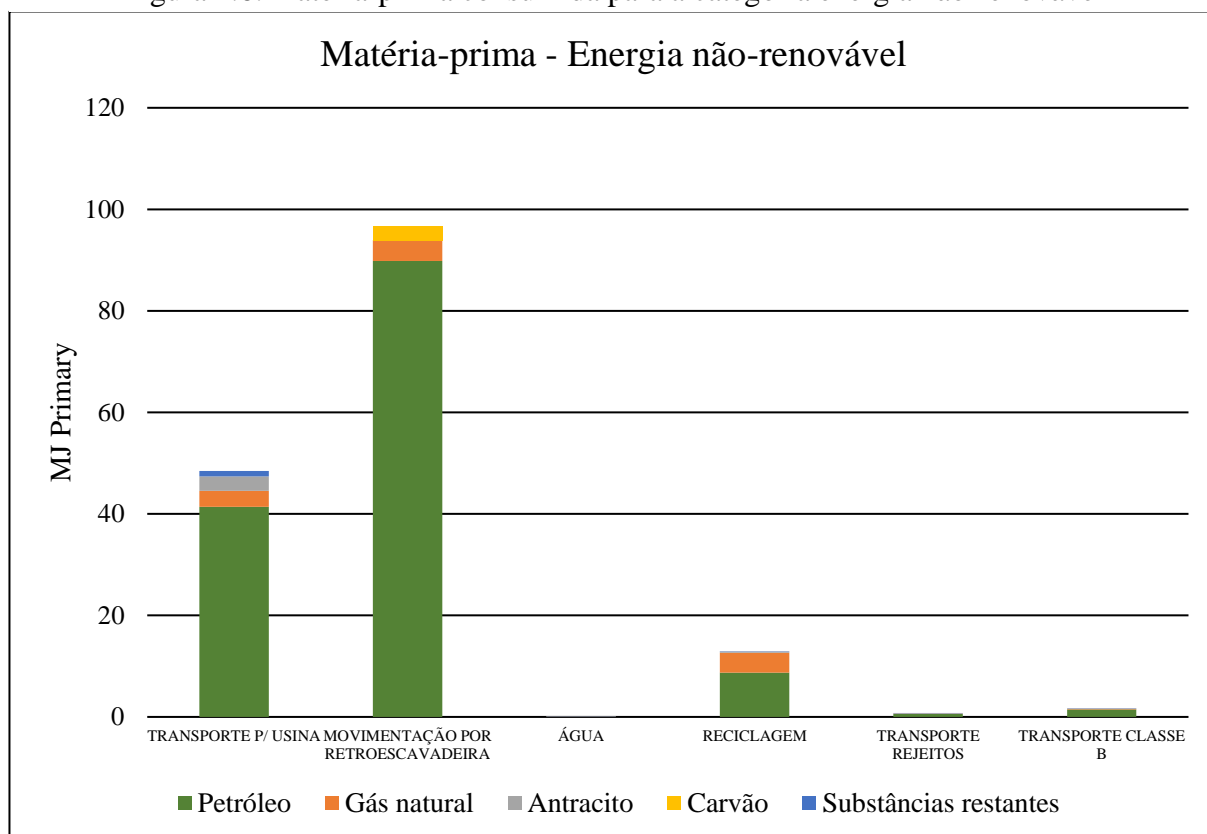
Figura 4.5: emissões que contribuem para a categoria Efeitos respiratórios inorgânicos



Fonte: autoria própria.

A análise contribucional para a categoria energia não-renovável (figura 4.6) mostra o elevado consumo de diesel nas etapas de movimentação por retroescavadeira, transporte e reciclagem, mostrando que este material derivado do petróleo é um dos grandes responsáveis pelo impacto ambiental para uma usina de reciclagem de RCC.

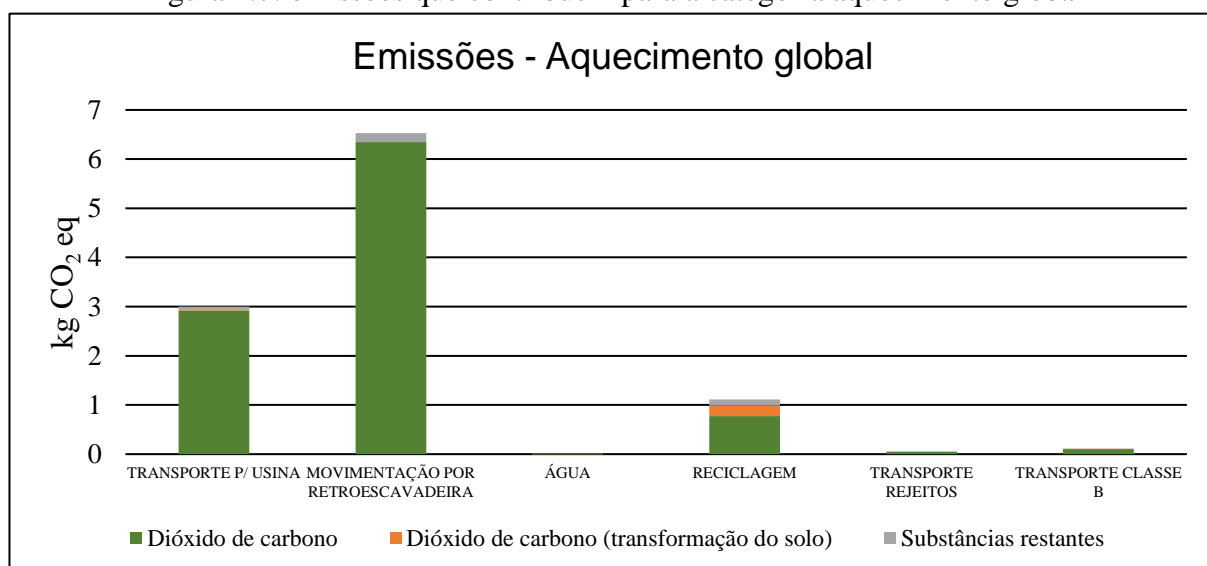
Figura 4.6: matéria-prima consumida para a categoria energia não-renovável



Fonte: autoria própria.

Na categoria aquecimento global (figura 4.7), destaca-se a emissão de dióxido de carbono (CO_2) em todas as etapas de operação, principalmente nas etapas de transporte e movimentação por retroescavadeira. Villela, Antunes, Silveira (2007) destaca que este composto é um dos grandes poluidores da atmosfera, derivado do consumo de óleo diesel.

Figura 4.7: emissões que contribuem para a categoria aquecimento global



Fonte: autoria própria.

De modo geral, o quadro 4.1 resume os dados obtidos através da análise contribucional para as categorias mais relevantes para o estudo, os fluxos elementares e os motivos para a ocorrência desses fluxos.

Quadro 4.1: principais dados obtidos a partir da análise contribucional dos impactos

CATEGORIAS DE IMPACTO	PRINCIPAIS PROCESSOS	PRINCIPAIS FLUXOS ELEMENTARES	RAZÃO
Efeitos respiratórios inorgânicos	Movimentação por retroescavadeira	Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Consumo de diesel por retroescavadeira
	Transporte para usina	Material particulado (MP _{2,5})	Consumo de diesel por veículo automotor
Energia não-renovável	Movimentação por retroescavadeira	Petróleo	Consumo de diesel por retroescavadeira
	Transporte para usina	Petróleo	Consumo de diesel por veículo automotor
	Reciclagem de RCC	Petróleo	Consumo de diesel na fabricação de agregado reciclado
Aquecimento global	Movimentação por retroescavadeira	Dióxido de carbono (CO ₂)	Consumo de diesel por retroescavadeira
	Transporte para usina	Dióxido de carbono (CO ₂)	Consumo de diesel por veículo automotor
Legenda			
	Emissão para o ar		Matéria-prima

Fonte: autoria própria.

4.4 Fase 03: Análise dos Resultados

Do quadro 4.1, presume-se que o diesel pode ser considerado como o recurso que causa os maiores danos à natureza. De fato, há na literatura muitos estudos na temática de ACV de gerenciamento de resíduos da construção que chegaram à essas conclusões, sendo que muitos desses estudos propuseram alternativas que atenuem os impactos causados pelo diesel, com foco nos processos de transporte e triagem.

Utilizando a metodologia Impact 2002+, Blengini e Garbarino (2010) avaliaram o sistema de gerenciamento de RCC na Região de Torino (Itália) e constataram ganhos ambientais decorrentes da reciclagem de RCC, mas que, para longas distâncias, os impactos induzidos superam os impactos evitados. Desse modo, os autores sugerem uma gestão eficiente na rede de coleta e distribuição do RCC que não comprometa o desempenho ambiental geral do sistema. Vossberg, Mason-Jones, Cohen (2014) e Butera, Christensen, Astrup (2015) chegaram a resultados semelhantes, sendo que este último determina distâncias menores que 40 km para garantir os ganhos ambientais do sistema. Faleschini et al. (2016) propõem a utilização

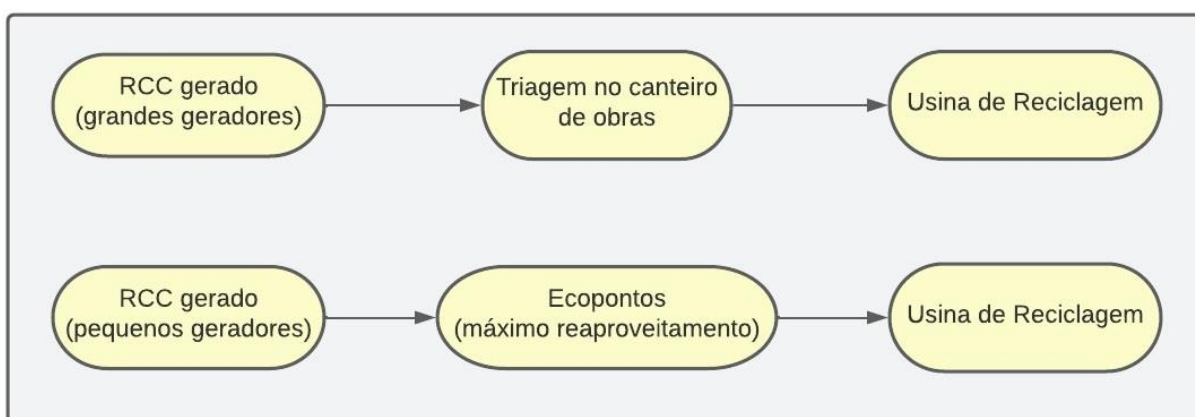
de placas fotovoltaicas nas dependências da usina, de modo que se permita uma compensação nas distâncias de transporte.

A fim de avaliar os impactos ambientais decorrentes das diferentes estratégias de triagem de resíduos da construção civil, Hossain Wu, Poon (2017) compararam três cenários de gerenciamento de resíduos: sistema de reciclagem com triagem ainda no canteiro de obras, sistema de reciclagem com triagem na usina e sistema de disposição do resíduo em aterro sanitário. Os resultados apresentados mostram ganhos ambientais ao se considerar a reciclagem, sendo a opção com triagem no canteiro de obras a mais benéfica.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), a triagem deve ser realizada preferencialmente pelo gerador, seguindo o objetivo prioritário da não geração de resíduos. Isso pode reduzir os impactos com transporte, haja vista que um menor número de viagens será necessário para encaminhar o resíduo de construção para reciclagem, ao mesmo tempo que se diminui o tempo gasto com retroescavadeira dentro da usina, já que uma menor quantidade de material será movimentada no pátio de recepção.

Dessa forma, a melhor configuração para o gerenciamento de resíduos da construção civil na Região Metropolitana de Belém é a apresentada na figura 4.8, apoiado na literatura e no Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Belém (BELÉM, 2020a, 2020b).

Figura 4.8: configuração que melhor atende a gestão dos RCC em Belém, de acordo com o estudo de ACV.



Fonte: autoria própria.

Para os grandes geradores, a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) determina a elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, que deverão ser apresentados, juntamente com o projeto do empreendimento, para análise do poder público municipal, em conformidade com o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção

Civil. A elaboração deste documento deve priorizar uma estratégia de triagem feita pelo próprio gerador, cabendo ao poder público incentivar esta ação. Isso reduziria os impactos ambientais, conforme mostrado por Hossain, Wu, Poon (2017).

Para os pequenos geradores, pode ser priorizado a criação de Ecopontos, que são áreas públicas destinadas a receber resíduos em pequenas quantidades, com o objetivo principal de se reaproveitar o máximo possível os materiais ali recebidos (BELÉM, 2020b). Rosado (2015) destaca a importância deles em seu estudo, apontando que estes espaços vão diminuir a disposição irregular de resíduos de construção, oriundos, em grande parte, de pequenos geradores. Para isso, as instalações de ecopontos deve seguir as diretrizes da NBR 15112 (ABNT, 2004e).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, pode-se dizer que esta pesquisa alcançou o objetivo proposto, que era de analisar os possíveis impactos ambientais decorrentes da operação futura de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil na Região Metropolitana de Belém, através de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), propondo a implantação da usina, identificando os dados de inventário necessários para modelagem dos processos de operação, analisando quais destes processos causam os maiores prejuízos ambientais e apontando maneiras para que a gestão dos resíduos de construção possa funcionar, de modo que haja um menor impacto possível no meio ambiente.

Ficou constatado que a cidade de Belém e sua Região Metropolitana sofrem com a gestão inadequada de resíduos sólidos, sendo que os resíduos da construção são, na maioria das vezes, dispostos em locais públicos, sem controle, cabendo ao poder público realizar a coleta desse material que, muitas vezes, não é possível devido a sobrecarga no sistema. Além disso, o Plano Municipal de Saneamento Básico para a cidade de Belém (BELÉM, 2020b) prevê apenas a concepção de aterros licenciados para disposição final desses materiais, não aproveitando as potencialidades que a resíduos de construção possuem para reciclagem e nem atendendo o que diz a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), que indica a disposição em aterros como a última alternativa para a disposição dos resíduos sólidos.

Assim, a metodologia deste trabalho propôs, em sua primeira fase, a implantação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção que atenda ao volume de resíduos gerado mensalmente na cidade, de 1244 m³, segundo Maués, Beltrão, Silva (2021). A capacidade de produção foi estimada em 9 t/h, para atender a demanda, e a área escolhida foi o Aterro do Aurá, pois trata-se de um espaço que já é utilizado para destinação final deste tipo de resíduo e atende ao que diz Jadovski (2005) com relação a área necessária para as operações de reciclagem. Por fim, nessa fase, os equipamentos foram escolhidos com base no estudo de Rosado et al. (2017), que são comuns a grande maioria das usinas de reciclagem espalhadas pelo Brasil.

A Avaliação do Ciclo de Vida foi realizada para a usina, na fase 02 do estudo, constatando grandes impactos ambientais nos processos que dependem do diesel para serem realizados, como o transporte e a movimentação por retroescavadeira. Estes resultados vão de encontro aos estudos realizados por Rosado et al. (2017) e Delbianco (2018), que obtiveram

grandes impactos derivados do diesel nestes processos. Além disso, os resultados normalizados mostram que três categorias de impacto representam 89% de toda a carga ambiental negativa: efeitos respiratórios inorgânicos, energia não renovável e aquecimento global, resultado semelhante ao obtido por Rosado et al. (2017).

A categoria efeitos respiratórios inorgânicos representa as emissões de poluentes como óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado ($\text{MP}_{2,5}$), dióxido de enxofre e amônia (NH_3), gases considerados nocivos à saúde humana, principalmente ao sistema respiratório (SCHAFHAUSER, 2019). O estudo encontrou grandes emissões de NO_x e $\text{MP}_{2,5}$ associados ao transporte e movimentação da retroescavadeira.

A categoria aquecimento global representa as emissões de gases do efeito estufa (GEE) como dióxido de carbono (CO_2), gás metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), sendo que os efeitos associados à emissão desses gases estão associados às mudanças climáticas: aumento da temperatura média dos ar e oceanos, derretimento de geleiras e elevação do nível dos mares (SCHAFHAUSER, 2019). A ACV para a usina de reciclagem encontrou grandes emissões de CO_2 , mais uma vez associadas ao transporte e a movimentação por retroescavadeira.

A categoria energia não renovável representa o consumo de energia que utiliza recursos naturais esgotáveis, no curto, médio e longo prazo, sendo que a queima destes combustíveis gera, além do esgotamento de recursos, poluição do ar, prejudicando o meio ambiente e a saúde humana (SCHAFHAUSER, 2019). As análises realizadas neste estudo destacam o uso de diesel, nas etapas de reciclagem, transporte e movimentação por retroescavadeira.

Todas essas análises indicam que os processos que dependem da queima do diesel apresentam os maiores impactos ambientais em uma usina de reciclagem de RCC. Por isso, grande parte dos estudos relacionados à temática focam suas análises nos processos de triagem e transporte. As soluções comumente apresentadas são: racionalização da gestão dos RCC, de modo a se otimizar as distâncias de transporte (BLENGINI; GARBARINO, 2010; BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2015; VOSSBERG; MASON-JONES; COHEN, 2014); e realização de triagem dentro do canteiro de obras, além da implantação de ecopontos espalhados pela cidade, voltados aos pequenos geradores (HOSSAIN; WU; POON, 2017; ROSADO, 2015). Dessa forma, com base no estudo de ACV e apoiada nos estudos acima citados, foi proposta a implantação de um sistema de gerenciamento que atenda aos grandes e pequenos geradores: para o primeiro grupo, o poder público deve apoiar a triagem no canteiro de obras,

de modo que possa reduzir a quantidade de resíduos a ser reciclada e maximizar o reaproveitamento, sendo que seria encaminhado ao canteiro somente aquilo que for reciclável, reduzindo o tempo de operação de retroescavadeiras e quantidade de viagens para transportar o material. Para o segundo grupo, a implementação de ecopontos serviria como solução para a grande quantidade de descarte irregular apresentada na cidade de Belém, ao mesmo tempo que proporcionaria a diminuição do material que chega na usina para ser triado, devido ao máximo reaproveitamento, obtendo os mesmos benefícios apresentados ao primeiro grupo. Fica evidente, nesse sentido, a participação do poder público, juntamente com a conscientização da sociedade, para que as propostas, de fato, funcionem.

Como limitadores para a realização deste trabalho, destacam-se:

- A ausência de dados de composição gravimétrica de RCC para a Região Metropolitana de Belém;
- A ausência de estudos que avaliem as condições que o Aterro do Aurá possui para se implantar uma usina de reciclagem de RCC sem que haja prejuízos ambientais para a região de influência;
- A impossibilidade de se avaliar os impactos evitados (impactos de produção do agregado natural e disposição do RCC em aterro de inertes) devido a limitação no uso do *software SimaPro*;
- A impossibilidade de se avaliar a reciclagem de RCC classe B e a disposição dos rejeitos (resíduos classes C e D) em aterro sanitário, também devido a limitação no uso do *software SimaPro*.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A realização desta pesquisa abre o leque para outros estudos nessa temática, uma vez que não existem usinas de reciclagem de RCC na Região Norte do Brasil. Dessa forma, abaixo são apresentadas algumas propostas:

- Realização de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para as condições atuais de gerenciamento de RCC na Região Metropolitana de Belém;
- Realização de um estudo de viabilidade econômica para implantação da usina de reciclagem de RCC na Região Metropolitana de Belém;

- Realização de um estudo comparativo entre os impactos ambientais decorrentes da produção de agregado natural e agregado reciclado para a Região Metropolitana de Belém, através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV);
- Realização de um estudo de análise de sensibilidade, mostrando o quanto a distância de transporte provoca variação nos impactos ambientais da operação de uma usina de reciclagem de RCC.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. 7p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. 10p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004b.

ABNT. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. 7p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004c.

ABNT. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. 7p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004d.

ABNT. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. 7p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004e.

ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura (Versão corrigida: 2014). 21p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações (Versão corrigida: 2014). 46p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2009b.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**, p. 54, 2021.

ABU HAJAR, H. A. et al. Assessment of the municipal solid waste management sector development in Jordan towards green growth by sustainability window analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120539, 2020.

AGÊNCIA BELÉM. **Prefeitura notifica responsáveis por obstrução da via pública com**

entulhos. Disponível em: <<https://agenciabelem.com.br/Noticia/183710/prefeitura-notifica-responsaveis-por-obstrucao-da-via-publica-com-entulhos>>. Acesso em: 10 de ago. de 2022.

AHMED, R. R.; ZHANG, X. Multi-stage network-based two-type cost minimization for the reverse logistics management of inert construction waste. **Waste Management**, v. 120, p. 805–819, 2021.

ALBERTE, E. P. V.; HANDRO, J. B. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 305–320, 2021.

AMIN, S. H.; ZHANG, G. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 6, p. 4165–4176, 2013.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** 2005. 167p. Tese (doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. **Concreto com agregados reciclados.** Concreto: Ciência e Tecnologia. Instituto Brasileiro do Concreto, p. 1731–1767, 2011.

ARAÚJO, M. G. **Modelo de avaliação do ciclo de vida para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no Brasil.** 2013. 232p. Programa de Planejamento Estratégico, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BELÉM. Secretaria Municipal de Saneamento (SESAN). **Plano Municipal de Saneamento Básico - Belém-PA - Relatório 3.2 (Diagnóstico e Propostas Regionais).** 378p. Belém, 2020a.

BELÉM. Secretaria Municipal de Saneamento (SESAN). **Plano Municipal de Saneamento Básico - Belém-PA - Relatório 4.4 (prognóstico e alternativas para universalização dos serviços de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos).** 187p. Belém, 2020b

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E. Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. **Journal of Cleaner Production**, v.

18, n. 10–11, p. 1021–1030, 2010.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 307 - Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 348 - Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, 2004.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Área de Manejo de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos: orientação para o seu licenciamento e aplicação da resolução CONAMA nº 307/2002**. Brasília. 45p. 2005.

BRASIL. **Lei nº 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 431 - Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 469 - Altera o inciso II do artigo 3º da Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, 2015.

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

CABRAL, A. E. B. et al. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 55, n. 336, p. 448–460, 2009.

CLIFT, R.; DOIG, A.; FINNVEDEN, G. The application of Life Cycle Assessment to Integrated Solid Waste Management. Part 1 - Methodology. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 78, n. 4, p. 279–287, 2000.

COELHO, A.; BRITO, J. DE. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part I: Energy consumption and CO₂ emissions. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1258–1267, 2013a.

COELHO, A.; BRITO, J. DE. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part II: Environmental sensitivity analysis. **Waste Management**, v. 33, n. 1, p. 147–161, 2013b.

CÓRDOBA, R. E. **Estudo do Sistema de Gerenciamento Integrado de Resíduos de Construção e Demolição do Município de São Carlos-SP**. Universidade de São Paulo, p. 372, 2010.

DALMO, F. C. et al. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 461–474, 2019.

DANISH, M. S. S. et al. A novel transdisciplinary paradigm for municipal solid waste to energy. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 880–892, 2019.

DE OLIVEIRA, U. R. et al. Risk management applied to the reverse logistics of solid waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 296, 2021.

DELBIANCO, L. B. **Avaliação ambiental e técnica de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil da região administrativa de Campinas/SP**. 2018. 119p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP 2018.

DIAS, K. T. S.; BRAGA, S. S. The use of reverse logistics for waste management in a Brazilian grocery retailer. **Waste Management and Research**, v. 34, n. 1, p. 22–29, 2016.

FALESCHINI, F. et al. Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant. **Waste Management**, v. 49, n. 2016, p. 146–155, 2016.

FLAMINI, S. H. Para onde vai o resíduo que você gera? **Guia Universitário de Informações Ambientais**, v. 2, n. 1, p. 56–58, 2021.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Systematic literature review: concept, production and publication. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57–73, 2019.

GHANBARI, M.; ABBASI, A. M.; RAVANSHADNIA, M. Economic and Environmental Evaluation and Optimal Ratio of Natural and Recycled Aggregate Production. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017a.

GHANBARI, M.; ABBASI, A. M.; RAVANSHADNIA, M. Environmental Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Aggregate Production Industries. v. 15, n. 3, p. 1577–1593, 2017b.

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, n. 2, p. 810–822, 2018.

GOEDKOOPE, M. et al. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level / Report I: Characterization**. Potentials, p. 1–44, 2009.

GOOGLE EARTH. **Aterro do Aurá**. Disponível em: <encurtador.com.br/ICT29>. Acesso em: 10 de ago. de 2022.

GOOGLE MAPS. **Distância entre o Aterro do Aurá e o Aterro Sanitário de Marituba**. Disponível em: <encurtador.com.br/dekoD>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

GOOGLE MAPS. **Distância entre o Aterro do Aurá e a recicladora privada**. Disponível em: <encurtador.com.br/agEJ3>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

GOULART COELHO, L. M.; LANGE, L. C. Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 438–450, 2018.

GOVINDAN, K.; SOLEIMANI, H. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 371–384, 2017.

GREEN, S. Systematic Reviews and Meta-Analysis. **Evidence-Based Orthopedics**, v. 46, n. 6, p. 270–274, 2005.

HAO, J. et al. A model for assessing the economic performance of construction waste reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 427–440, 2019.

HELENE, P. R. DO L.; LEVY, S. M. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção**. Boletim Técnico - EPUSP, 2002.

HOSSAIN, M. U. et al. 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.

HOSSAIN, M. U.; WU, Z.; POON, C. S. Comparative environmental evaluation of construction waste management through different waste sorting systems in Hong Kong. **Waste Management**, v. 69, p. 325–335, 2017.

HUSSIN, J. M.; RAHMAN, I. A.; MEMON, A. H. The Way Forward in Sustainable Construction: Issues and Challenges Keyword: Sustainable construction Green building Issues in construction Time Overrun Cost Overrun Construction Waste. **International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)**, v. 2, n. 1, p. 31–42, 2013.

IBICT. **Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos - Guia Geral para Avaliações do Ciclo de Vida - Orientações Detalhadas**. 319p. Brasília, 2014.

IBICT. **O que é Avaliação do Ciclo de Vida**. Disponível em: <encurtador.com.br/bcuTY>. Acesso em 10 de nov. de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2020**. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS. Disponível em: <encurtador.com.br/nQVY6>. Acesso em 19 de ago. de 2022.

JADOVSKI, I. **Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição**. 2005. 178p. Trabalho de conclusão (Mestrado Profissional), Escola de Engenharia, Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

JAIN, S.; SINGHAL, S.; PANDEY, S. Environmental life cycle assessment of construction and demolition waste recycling: A case of urban India. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, n. December 2019, p. 104642, 2020.

JOLLIET, O. et al. Impact 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **Int J LCA**, v. 8, p. 324–330, 2003.

KAZA, S. et al. **What a waste 2.0 - A global snapshot of solid waste management to 2050**. Urban Development Series, World Bank Group, 272p. 2018.

KERN, A. P. et al. Implantação de plantas de reciclagem de RCD: análise financeira, fatores de influência e o papel dos principais agentes. **Mix Sustentável**, v. 7, n. 2, p. 79–92, 2021.

KHOR, K. S.; UDIN, Z. M. Impact of Reverse Logistics Product Disposition towards Business Performance in Malaysian E & E Companies. **Journal of Supply Chain and Customer Relationship Management**, v. 2012, 2012.

LEITE, J. A. G. **Gestão dos resíduos de construção civil procedentes de pequenas construções no município de Belém-PA**. 2019. 116p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

LI, J. et al. Environmental impact assessment of mobile recycling of demolition waste in Shenzhen, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121371, 2020.

LIIKANEN, M. et al. Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management – A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 150–162, 2018.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Eng Sanit Ambient**, v. 18, n. 2, p. 169–176, 2013.

LIMA, L. M. DE J. A.; ABREU, M. T. Avaliação da conscientização sobre a destinação dos resíduos sólidos urbanos nas universidades em Belém (PA). **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 17, n. 1, p. 300–314, 2022.

MAH, C. M.; FUJIWARA, T.; HO, C. S. Concrete waste management decision analysis based on life cycle assessment. **Chemical Engineering Transactions**, v. 56, n. 2015, p. 25–30, 2017.

MAH, C. M.; FUJIWARA, T.; HO, C. S. Environmental impacts of construction and demolition waste management alternatives. **Chemical Engineering Transactions**, v. 63, n. 2001, p. 343–348, 2018.

MALMIR, T.; RANJBAR, S.; EICKER, U. Improving municipal solid waste management strategies of Montréal (Canada) using life cycle assessment and optimization of technology options. **Energies**, v. 13, n. 21, 2020.

MAUÉS, L. M.; BELTRÃO, N.; SILVA, I. Ghg emissions assessment of civil construction waste disposal and transportation process in the eastern amazon. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 10, 2021.

MAUÉS, L. M. F. et al. Estimating construction waste generation in residential buildings: A fuzzy set theory approach in the Brazilian Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, 2020.

MÁQUINAS FARIA. **Peneira Vibratória**. Disponível em: < encurtador.com.br/uzOP0 >. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

MELO, A. V. S. **Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil**. 2011. 232p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

MERCANTE, I. T. et al. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: A Spanish case study. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 232–241, 2012.

NEVES, P. B. **Características de fragmentação e microestruturais de rochas e seu comportamento na britagem para a produção de agregado**. 2005. 129p. Dissertação (Mestrado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OLIVEIRA, M. E. D. DE et al. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza / CE. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 13, p. 219–224, 2011.

ORTIZ, O.; PASQUALINO, J. C.; CASTELLS, F. Environmental performance of construction waste: Comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. **Waste Management**, v. 30, n. 4, p. 646–654, 2010.

PAES, M. X. et al. Transition towards eco-efficiency in municipal solid waste management to reduce GHG emissions: The case of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121370, 2020a.

PAES, M. X. et al. Municipal solid waste management: Integrated analysis of environmental and economic indicators based on life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 119848, 2020b.

PAMPEIRO. **Britagem e Trituração**. Disponível em: < encurtador.com.br/fqwW8 >. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

PENTEADO, C. S. G.; ROSADO, L. P. Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. **Waste Management and Research**, v. 34, n. 10, p. 1026–1035, 2016.

PIZONI, E. **Diretrizes para reciclagem do RCD gerado no município de farroupilha como agregado na pavimentação de vias rurais**. 2019. 93p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2019.

PRÉ SUSTAINABILITY. **Simapro Database Manual**. 2020. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>>

PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2013, 276p, 2º ed, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, 2013.

RAMÍREZ, P. K. S. **Análise de métodos de alocação utilizados em avaliação do ciclo de vida**. 2009. 138p. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ROSADO, L. P. **Avaliação do Ciclo de Vida de Alternativas para o Gerenciamento Integrado de Resíduos da Construção Civil do Município de Limeira/SP, Brasil**. 2015. 345p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2015.

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

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

ROSADO, L. P.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of municipal construction and demolition waste management system of Campinas Metropolitan Region. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 71–82, 2019.

SCHAFHAUSER, A. D. **Análise do ciclo de vida de resíduos de construção e demolição usados como base de pavimentos urbanos**. 2019. 175p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2019.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 598–614, 2017.

SIMION, I. M. et al. Comparing environmental impacts of natural inert and recycled construction and demolition waste processing using LCA. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 21, n. 4, p. 273–287, 2013.

SOBRAL, R. F. C. **Viabilidade Econômica de Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil: Estudo de Caso da USIBEN - João Pessoa / PB**. 2012. 117p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

SOBRATEMA. **Usinas de reciclagem de resíduos são fundamentais para o fechamento do ciclo produtivo**. Disponível em: <encurtador.com.br/pCSX2>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

SOUSA, M. R. DE; RIBEIRO, A. L. P. Revisão sistemática e meta-análise de estudos de diagnóstico e prognóstico: um tutorial. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 92, n. 3, p. 241–251, 2009.

TELEDETRITUS. **Como funciona a reciclagem de resíduos sólidos da construção civil**. Disponível em: <encurtador.com.br/dACD2>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

TRIBUNA. **Região Metropolitana - 'Entulho' é problema para municípios**. Disponível em: <encurtador.com.br/dpruC>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

VILLELA, I. A. C.; ANTUNES, J. S.; SILVEIRA, J. L. Impacto ambiental de uma planta termelétrica: emissões de dióxido do carbono, óxidos de nitrogênio, material particulado e

dióxido sulfúrico. **Janus**, v. 4, n. 5, 2007.

VOSSBERG, C.; MASON-JONES, K.; COHEN, B. An energetic life cycle assessment of C&D waste and container glass recycling in Cape Town, South Africa. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 88, p. 39–49, 2014.

WEIDEMA, B. P. et al. Overview and methodology - Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. **Angewandte Chemie International Edition**, 6(11), 951–952., 2013.

YAZDANBAKHSH, A. A bi-level environmental impact assessment framework for comparing construction and demolition waste management strategies. **Waste Management**, v. 77, p. 401–412, 2018.

ZANELLA, L. C. H. Metodologia de Pesquisa 2013 2a edição reimpressa. **Departamento de Ciências da Administração/ UFSC**, 2017.

Anexo A – Principais resultados da Revisão Sistemática da Literatura

A Revisão Sistemática da Literatura obteve um total de 38 artigos na fase de extração, que foram classificados com graus de importância, variando entre “prioridade baixa” até “prioridade alta”. Os que foram classificados como prioridade alta são descritos no quadro abaixo.

Artigos classificados como prioridade alta

(continua)

Autor (ano)	Objetivo geral	Resultados
Ortiz, Pasqualino, Castells (2010)	Avaliar o impacto ambiental do resíduo de construção em três cenários: disposição em aterro, incineração e reciclagem, na cidade de Barcelona	Em se tratando de emissões de CO ₂ (Global warming) a reciclagem se mostrou a melhor alternativa, seguida de incineração e disposição em aterro
Blengini e Garbarino (2010)	Avaliar as implicações ambientais e energéticas da cadeia de reciclagem de RCC na região de Torino (Itália)	Impactos ambientais evitados são maiores que os impactos ambientais induzidos
Mercante et al. (2012)	Realizar o Inventário do Ciclo de Vida do sistema de gerenciamento de resíduos da construção	Impactos ambientais de usinas de reciclagem de RCC podem ser reduzidos através de separação de resíduos na fonte geradora
Simion et al. (2013)	Quantificar os impactos ambientais para produção de agregado natural e reciclado	A reciclagem para produção de agregado reciclado se mostra mais benéfica que utilização de agregado natural
Coelho e Brito (2013a)	Avaliar o desempenho ambiental de uma usina de reciclagem de RCC	Impactos gerados menores que impactos evitados
Coelho e Brito (2013b)	Análise de sensibilidade do estudo anterior	
Vossberg, Mason-Jones, Cohen (2014)	Comparar os impactos ambientais de reciclagem versus disposição em aterro para dois materiais: recipientes de vidro e resíduos de construção	Estratégias de reciclagem podem diminuir as cargas ambientais, porém grandes distâncias de transporte podem comprometer esses valores

Artigos classificados como prioridade alta

(continuação)

Autor (ano)	Objetivo geral	Resultados
Butera, Christensen, Astrup (2015)	Avaliar os impactos ambientais associados aos resíduos de construção em duas hipóteses de aproveitamento: (1) agregado reciclado para construção de estradas e (2) disposição em aterro	A utilização do agregado reciclado em construções de estradas se mostrou mais ambientalmente amigável que a opção de disposição em aterro
Hossain et al. (2016)	Quantificar os impactos ambientais para produção de agregado natural e reciclado	Redução de 65% nas emissões de gás carbônico e 58% no consumo de energia não renovável referentes à produção de agregado reciclado
Faleschini et al. (2016)	Quantificar os impactos ambientais para produção de agregado natural e reciclado	Destaca os ganhos obtidos pela reciclagem, ressaltando a importância das distâncias de transporte
Penteado e Rosado (2016)	Avaliação ambiental de diferentes cenários de gerenciamento de resíduos da construção	Resultados favoráveis à reciclagem, desde que haja triagem no canteiro e que a distância de transporte não ultrapasse os 30km
Rosado et al. (2017)	Quantificar os impactos ambientais para produção de agregado natural e reciclado	A reciclagem para produção de agregado reciclado se mostra mais benéfica que utilização de agregado natural
Mah, Fujiwara, Ho (2017)	Análise do Ciclo de Vida para RCC em três cenários: disposição em aterro, reciclagem para uso em base e sub-base de pavimentos e reciclagem para uso como agregado de concreto	A reciclagem de RCC para produção de agregados para concreto se mostrou mais benéfica que as outras duas alternativas
Hossain, Wu, Poon (2017)	Comparar diferentes sistemas de gerenciamento de resíduos para a cidade de Hong Kong (sistema de triagem de RCC fora do canteiro, sistema de triagem de RCC no canteiro e disposição em aterro)	Sistema de triagem de RCC fora do canteiro e disposição em aterro apresentaram os maiores impactos ambientais

Artigos classificados como prioridade alta

(conclusão)

Autor (ano)	Objetivo geral	Resultados
Mah, Fujiwara, Ho (2018)	Avaliar os impactos ambientais envolvidos em diversas alternativas de gerenciamento de resíduos da construção (redução, reciclagem, incineração e disposição em aterro de inertes)	Redução de impactos em até 82,3% ao se considerar reciclagem total e mínima distância de transporte
Borghi, Pantini, Rigamonti (2018)	Aplicação de ACV para avaliar cenário atual de gerenciamento de RCC	Grandes impactos induzidos, entretanto, melhores que disposição em aterro
Rosado et al. (2019)	Investiga o desempenho ambiental do gerenciamento de resíduos de construção na Bacia Hidrográfica Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), São Paulo, através da comparação de cenário atual e alternativos	Impactos ambientais derivados do transporte de RCC
Rosado e Penteado (2019)	Avaliar o desempenho ambiental do sistema de gerenciamento de resíduos da construção na Região Metropolitana de Campinas	Impactos ambientais reduzidos comparados com o cenário atual, no entanto as distâncias de transporte podem comprometer os resultados favoráveis
Li et al. (2020)	Avaliar os impactos ambientais e benefícios envolvidos no uso de plantas móveis de reciclagem de resíduos da construção	Diminuição dos impactos relativos à ocupação de terra
Jain, Singhal, Pandey (2020)	Comparar disposição em aterro e reciclagem de RCC	Ganhos ambientais na reciclagem de RCC

Fonte: autoria própria