

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

EMILIN REGINA GOMES DOBROVOLSKI

MÉTODO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA COM RELAÇÃO A  
PEGADA DE CARBONO DE AGREGADO RECICLADO PARA PAVIMENTAÇÃO

PONTA GROSSA

2022

EMILIN REGINA GOMES DOBROVOLSKI

MÉTODO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA COM RELAÇÃO A  
PEGADA DE CARBONO DE AGREGADO RECICLADO PARA PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil da Universidade Estadual de  
Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Patricia Kruger.

PONTA GROSSA  
2022

EMILIN REGINA GOMES DOBROVOLSKI

MÉTODO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA COM RELAÇÃO A  
PEGADA DE CARBONO DE AGREGAD RECILADO PARA PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso julgado e aprovado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Ponta Grossa, 05 de dezembro de 2022.

---

Profa. Dra. Patricia Kruger - Orientadora  
Doutora em Engenharia e Ciência de Materiais  
Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof. Dr. Eduardo Pereira  
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais  
Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof. Dr. Rafael Jansen Mikami  
Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais  
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Dedico este trabalho a minha família, pois foi nela que descobri a minha paixão pelo meio ambiente. De alguma forma, esse trabalho também é de vocês.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois Ele é o começo, meio e fim de toda a minha história acadêmica, e tem me sustentado e guiado até aqui. Agradeço também à minha família, principalmente aos meus pais, Selma e Edilson, por todo os esforço, apoio e consideração na minha caminhada. Agradeço as minhas amizades e ao meu companheiro Marcio, sua compreensão e presença nessa caminhada foi essencial.

Agradeço a Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Patricia Kruger, por ter confiado em mim nesse projeto, me orientado com excelência, e por todos esses anos de parceria dentro e fora das salas. Agradeço também a acadêmica Amanda Sutil, sem a sua ajuda, nada disso teria sido conquistado. Agradeço a Universidade Estadual de Ponta Grossa e aos seus funcionários, por ceder a estrutura para contribuir com minha construção de conhecimento.

Agradeço também a todos que não foram citados aqui, mas que de alguma forma me influenciaram nas minhas escolhas e me acompanharam durante essa graduação.

“Todas as coisas foram feitas por intermédio dEle;  
sem Ele, nada do que existe teria sido feito.”

João 1:3

## RESUMO

O fato da construção civil se mostrar como um grande gerador de impacto ambiental leva a necessidade de se contabilizar esses resultados. Um exemplo desse impacto é o enorme volume de resíduos sólidos gerados pelo setor e a significativa emissão atmosférica de gases do efeito estufa. Em primeiro lugar, o problema da geração desenfreada de resíduo de construção e demolição tem origem no seu gerenciamento, tanto com relação a sua produção quanto sua destinação final. Outro ponto é o fato de que a indústria da construção tem resultados expressivos com relação à pegada de carbono no decorrer de toda sua vida útil. Desse modo, uma das formas de avaliar o efeito dessas questões no meio ambiente é por meio da análise de ciclo de vida, um método que relata os impactos potenciais das entradas e saídas em um sistema de produto, considerando um conjunto de circunstâncias pré-definido. Assim, essa pesquisa tem como objetivo propor um modelo empírica de análise de ciclo de vida (ACV) de agregado reciclado, relacionado à pegada de carbono. Essa metodologia foi baseada nos procedimentos da NBR ISO 14040 e da NBR ISO 14044, utilizando diretrizes do GHG Protocol e de outras referências para modelagem numérica. A respectiva modelagem partiu do princípio de que suas parcelas serão compostas por uma relação entre composição do concreto ou uso de equipamentos durante o processamento da mistura e do RCD com a emissão de gases do efeito estufa (GEEs) de cada etapa. A partir disso, foi possível elencar três processos, dentre eles: produção do concreto, concretagem e demolição da estrutura, sendo permeados por etapas de transporte de material. Essas etapas foram classificadas e quantificadas, no quesito de emissão de gases do efeito estufa (GEEs) entre emissão dos componentes do concreto, emissão por uso de energia elétrica e emissão por queima de combustível, de modo que esses valores, em conjunto com dados de consumo, se tornassem constantes na equação montada. Assim, a equação de ACV foi modelada em função do tamanho do agregado reciclado, da resistência do concreto demolido, e das distâncias de transporte, sendo possível obter um valor numérico de pegada de carbono por meio das variáveis medidas durante o processamento do resíduo.

**Palavras-chave:** Impacto ambiental. Análise de ciclo de vida. Resíduo de construção e demolição. Pegada de carbono.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	18
Figura 2 – Estrutura básica da avaliação de ciclo de vida .....	21
Figura 3 – Exemplo da etapa de definições de escopo de um produto.....	22
Figura 4 – Exemplo de inventário de ACV para agregado reciclado .....	24
Figura 5 – Fluxograma da elaboração da metodologia de emissão de CO <sub>2</sub> .....	25
Figura 6 – Processos considerados no inventário de ACV para construção civil.....	26
Figura 7 – Metodologia para obtenção do inventário.....	27
Figura 8 – Processos elencados para o ICV do agregado reciclado para pavimentação .....	32
Figura 9 – Inventário de ciclo de vida de agregado reciclado de concreto para pavimentação .....	33
Figura 10 – Etapas de produção do concreto em concreteira .....	34
Figura 11 – Etapas de concretagem, uso e demolição do concreto em obra .....	35
Figura 12 – Etapas de tratamento do resíduo na usina de beneficiamento .....	36
Figura 13 – Consumo de britador por tamanho final do agregado processado .....	38
Figura 14 – Interface da base de dados openLCA .....	39
Figura 15 – Valores de pegada de carbono de literatura e calculados pela equação numérica .....	42



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de resíduo de construção civil .....	15
Quadro 2 – Destinação das diferentes classes de resíduos de construção .....	16
Quadro 3 – Glossário de termos da análise de ciclo de vida.....	21
Quadro 4 – Ficha catalográfica de produto para avaliação de ciclo de vida .....	26
Quadro 5 – Ficha catalográfica de ACV do agregado reciclado para pavimentação .....	30
Quadro 6 – Parâmetros adotados para modelagem da equação.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de potencial de aquecimento global em 100 anos .....	28
Tabela 2 – Faixa de traços de concreto padrões por resistência à compressão aos 28 dias .....	37
Tabela 3 – Índices de consumo de equipamentos para produção e demolição de concreto.....	38
Tabela 4 – Índices de emissão de GEE's por etapa de produção do agregado reciclado .....	39
Tabela 5 – Parâmetros de emissão de GEE's em função da resistência do concreto demolido .....	41
Tabela 6 – Valores adotados para exemplificação de aplicação do método empírico de ACV .....	41
Tabela 7 – Pegada de carbono por etapa dos exemplos de aplicação do método .....	43
Tabela A - 1 – Índices de consumo e de pegada de carbono dos componentes de concreto .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Avaliação do ciclo de vida
AICV	Avaliação do impacto do ciclo de vida
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
CBR	Índice de suporte Califórnia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CaO	Óxido de cálcio
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
FGVCS	Centro de estudos em sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas
GEEs	Gases do efeito estufa
ICV	Inventário do ciclo de vida
KgCO <sub>2</sub> eq	Quilograma de dióxido de carbono equivalente
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PAG 100	Potencial de aquecimento global em 100 anos
R-410 <sup>a</sup>	Gás refrigerante R-410 <sup>a</sup>
RCD	Resíduo de construção e demolição
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de enxofre
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	13
1.2. OBJETIVOS .....	14
1.2.1. Objetivo geral .....	14
1.2.2. Objetivos específicos .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1. DESTINAÇÃO E USO DE RCD .....	16
2.2. PEGADA DE CARBONO NA CONTRUÇÃO CIVIL.....	17
2.3. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA .....	20
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>25</b>
3.1. DETERMINAÇÃO DO ESCOPO E INVENTÁRIO DE PRODUTO .....	25
3.2. QUANTIFICAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO .....	27
3.3. ELABORAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO .....	28
<b>4. ESCOPO E INVENTÁRIO</b> .....	<b>30</b>
4.1. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA .....	31
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>34</b>
5.1. MODELAGEM DA EQUAÇÃO .....	34
5.1.1. Índices adotados para o modelo numérico.....	37
5.2. EMISSÃO DE GEE'S .....	39
5.2.1. Aplicação e interpretação do método numérico .....	41
5.2.2. Método numérico e sustentabilidade.....	44
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>52</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil vem se mostrando como um dos setores de grande influência na sociedade. Isso se confirma devido ao fato de o concreto vir se destacando como um dos materiais mais utilizados ao redor do mundo (ZHANG *et al.*, 2019). Inevitavelmente, conforme relata ABRECON (2014), o setor da construção gera um grande impacto ambiental desde os primórdios da humanidade, visto que desde o Império Romano existem registros da reutilização de resíduos de materiais de construções.

Um desses efeitos gerados no meio ambiente é a exploração desenfreada de recursos naturais. A utilização de materiais na construção chega a 50% de toda matéria prima produzida atualmente (SANTOS *et al.*, 2021). Essa grande demanda por materiais naturais gera uma grande quantidade de resíduos, devido ao processamento do material, e a uma emissão considerável de CO<sub>2</sub> na atmosfera, já que, por exemplo, somente a indústria cimenteira produz cerca de 7% de toda a emissão antropogênica de CO<sub>2</sub> (MAZURANA, 2019; ZHANG *et al.*, 2019).

Além disso, a própria indústria da construção também vem gerando uma quantidade expressiva de resíduos sólidos. No Brasil, somente no ano de 2021, foram coletados 47 milhões de toneladas de resíduo de construção e demolição (RCD), que, segundo a ABRELPE (2021), representa um aumento de 5,5% com relação ao ano de 2020, chegando a quase 57% da produção diária de resíduo sólido por habitante no país. Ainda com relação a gestão de recursos naturais, um dos principais efeitos tem sido a emissão de gases do efeito estufa (GEEs), destacando-se o dióxido de carbono. Isso é comprovado pelo fato da indústria da construção civil como um todo ser responsável por praticamente 1/3 da emissão global de GEEs (YILMAZ; SEYIS, 2021)

Conforme Mazurana (2019), a geração desse tipo de resíduo não leva somente a impactos ambientais, como também a desperdício econômico, já que a reutilização do mesmo leva a diminuição da retirada de matéria prima bem como a diminuição da necessidade de locais de destinação para o material, levando a economia nesses dois pontos. Segundo Reis *et al.* (2021), uma forma de reciclagem que possui um mercado já consolidado, e que abrange uma fatia grande da reutilização de RCD é a indústria da pavimentação, sendo que o material já é comprovadamente equivalente em características mecânicas ao agregado natural.

Segundo Schafhauser (2019), é essencial que se faça um gerenciamento de resíduos com intuito da sua utilização e destinação adequadas. Visto isso, diversas técnicas que visam quantificar e avaliar impactos ambientais se mostram eficazes no auxílio desse planejamento. Uma dessas técnicas é conhecida como avaliação de ciclo de vida (ACV), uma metodologia de avaliação de impactos ambientais normatizada, que, conforme a NBR ISO 14040 da ABNT (2009a), avalia impactos em potencial de um produto ao longo de toda sua cadeia produtiva e vida útil, relacionando aquilo que está sendo analisado com a etapa correspondente da produção e utilização do material.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

Optou-se pela aplicação da metodologia de ACV pois, conforme cita a NBR 14040 da ABNT (2009a), esse é um método versátil. Alguns aspectos são o auxílio na identificação de melhoria de aspectos de desempenho ambiental de um produto, no planejamento e no projeto de indústrias, governos e outras instituições, na escolha dos melhores indicadores ambientais a serem medidos em um processo, bem como no marketing de produtos comerciais, como no caso de rotulagens ambientais. Um exemplo de destaque é a análise de medidas compensatórias por meio de políticas públicas, por exemplo, a partir de dados de impacto ambiental de diversos produtos (MAZURANA, 2019).

Outro ponto de destaque é a crescente utilização da metodologia de ciclo de vida para materiais de construção civil, já que, segundo Paz (2020), é necessário o conhecimento dos indicadores ambientais da produção de agregados reciclados, mas que por outro lado, essas informações ainda são escassas. Assim, segundo relata a NBR 14044 da ABNT (2009b), há diversos indicadores ambientais que podem ser caracterizados pelo método ACV, e um dos que precisa de um olhar detalhado, quando se fala no contexto da construção civil, é a emissão de gases do efeito estufa, como já relatado anteriormente. Desse modo, o método em si é completo e aborda muitos pontos de vista, como a extração de matéria-prima, o transporte de materiais, o uso de combustíveis e de energia elétrica, a vida útil do produto e a disposição final do seu resíduo. Assim, formulou-se o seguinte questionamento: como quantificar o impacto ambiental gerado pela pegada de

carbono ao longo do ciclo de vida de resíduos de construção e demolição, por meio de um método numérico que seja replicável e de fácil utilização baseado em ACV.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia numérica empírica para avaliação de ciclo de vida, com relação à pegada de carbono, relacionada por meio da emissão de gases do efeito estufa, de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição para utilização em pavimentos.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- a) Identificar o escopo, e suas características, para determinação do ciclo de vida do RCD;
- b) Identificar o inventário de entradas e saídas de insumos no sistema do RCD;
- c) Quantificar a emissão gases do efeito estufa de cada etapa em bases de dados de ACV ou em outras bibliografias;
- d) Determinar a emissão total de gases do efeito estufa de cada etapa, bem como a pegada de carbono;
- e) Elaborar um método numérico que aborde a emissão de dióxido de carbono em função do agregado reciclado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A necessidade de melhoria nos quesitos de sustentabilidade no mercado da construção civil leva à busca por metodologias que quantifiquem o impacto ambiental de diversos produtos advindos do setor. Dentre eles, destaca-se o resíduo de construção e demolição, devido a sua grande quantidade gerada e a sua variabilidade de composição e das consequências geradas no meio ambiente (REIS *et al.*, 2021). Conforme a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (2002) define-se RCD como:

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

Assim, pode-se notar que é inerente ao material que ele tenha grande variabilidade na sua composição. Dessa forma, a própria Resolução nº 307 sugere que o resíduo seja classificado conforme sua composição, relatado no Quadro 1. A partir do observado no quadro, para reinserção direta dentro de obras de edificações como agregado reciclado, é recomendada a utilização de resíduos classe A tipos a) e b), devido a sua produção dentro do próprio canteiro, facilitando a logística do processo. Porém, dentro da própria classe A de RCD existem diversas composições, que influenciam diretamente no comportamento do resíduo e no impacto que geram no meio ambiente. A partir disso, existem diversas destinações para o agregado reciclado, visto que o CONAMA (2002) proíbe a disposição do material em aterros sanitários.

Quadro 1 – Classificação de resíduo de construção civil

Classificação		Caracterização
Classe A	Tipo a)	Construção e demolição de pavimentação e de obras de terra e infraestrutura, reciclável como agregado.
	Tipo b)	Construção e demolição de edificações de alvenaria convencional, reciclável como agregado.
	Tipo c)	Fabricação e demolição de peças pré-moldadas em concreto, reciclável como agregado.
Classe B		Reciclável para outras destinações, como plásticos, papeis, metais, vidros, madeiras e gesso.
Classe C		Não recicláveis.
Classe D		Perigosos, como materiais que contenham amianto.

Fonte: CONAMA (2002), adaptado.



## 2.1. DESTINAÇÃO E USO DE RCD

Quadro 2 – Destinação das diferentes classes de resíduos de construção

Classificação	Destinação
Classe A	Reutilização e reciclagem na forma de agregados ou encaminhamento a aterro de reservação de material para usos futuros;
Classe B	Reutilização, reciclagem ou encaminhamento a áreas de armazenamento temporário;
Classe C	Armazenagem conforme normas técnicas específicas;
Classe D	Armazenagem conforme normas técnicas específicas;

Fonte: CONAMA (2002), adaptado.

Conforme relatado anteriormente, é vedada a disposição final de agregado de RCD em aterros sanitários, mas deve ser priorizada a redução, reutilização e reciclagem do material, bem como seu devido tratamento. A especificação da destinação recomendada pela Resolução nº 307 do CONAMA (2002) está identificada no Quadro 2. A partir do observado no quadro, dentro do contexto da construção civil, o resíduo mais interessante para o mercado é o resíduo classe A.

Há diversos relatos na bibliografia da utilização de agregado reciclado em concretos, argamassas e blocos de construção, bem como em soluções geotécnicas e de pavimentação (SCHAFHAUSER, 2019). Além disso, Reis *et al.* (2021) relatam que, apesar do Brasil possuir uma alta taxa de produção de resíduos em toneladas/ano, ainda há pouca reutilização do material no mercado, sendo menos que 6,5% do produto. Porém, conforme os autores, os fatores predominantes na utilização do agregado reciclado estão em suas características físicas, como resistência mecânica e absorção, e na sua composição. Assim, devido ao fato de a composição influenciar nas propriedades físicas do produto, essa deve ser estudada criteriosamente (MESQUITA *et al.*, 2015)

Um ponto de destaque para o uso de agregado reciclado está na nova edição da NBR 15116 da ABNT (2021), que estabeleceu novos parâmetros para a sua utilização em concretos estruturais, já que a edição de 2004 proibia o uso. Nessa nova redação, a utilização de RCD está limitada àquele classificado como agregado reciclado de concreto, denominado ARCO, onde 100% da sua massa seja de fragmentos à base de cimento Portland e rochas minerais, ou seja, não é permitida a presença de teores de cerâmica vermelha, ou branca não polida. A substituição do agregado natural pelo agregado reciclado ARCO pode ser feita em até 20% da sua quantidade, e restrita a concretos estruturais com resistência máxima de 20 MPa.

Além disso, no contexto brasileiro, uma forma já difundida da reutilização de RCD é na construção de estradas e rodovias, conforme relata Melo *et al.* (2021). Segundo os autores, isso é efeito do fato de grande parte de PIB do país ser representado pelo setor agrícola, e isso levar a grande necessidade de estradas em zonas rurais com baixo volume de tráfego. Nesses casos, como relatado no trabalho, não há necessidade de técnicas avançadas de tratamento de resíduos, já que a aplicação do agregado é feita em camadas que exigem pouco desempenho mecânico do material. Conforme Schafhauser (2019), estudos de caso da utilização de agregado reciclado em pavimentos no Brasil vêm mostrando desempenho satisfatório.

Esses resultados se deram devido ao fato de que a NBR 15115 da ABNT (2004), que regulamenta o uso de RCD em pavimentos, aborda critérios de uso simples, baseando-se na resistência mecânica obtida pelo Índice de Suporte Califórnia (CBR) e na granulometria do agregado. Além disso, segundo relata Lunardi (2020), algumas vantagens impulsionam a utilização de RCD na pavimentação de rodovias, como a diminuição de custo do pavimento, a destinação amigável de entulho advindo de pequenos geradores, por conta da baixa necessidade de beneficiamento do material, e a maior eficiência do RCD em comparação ao agregado natural para leitos de solo saprolítico.

Silva e Melo (2021) relatam que a utilização do material reciclado em soluções de construção civil vem se tornando cada vez mais frequente, levando a diminuição de impactos ambientais advindos do resíduo e da extração de recursos naturais, almejando uma construção mais sustentável. Isso também se repete no cenário da pavimentação, conforme relatado anteriormente. Assim, é necessário avaliar os impactos que o RCD vem causando.

## 2.2. PEGADA DE CARBONO NA CONTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil é responsável por diversas interferências negativas no meio ambiente. Um exemplo de destaque, conforme já citado, é a emissão atmosférica de CO<sub>2</sub>, devido ao fato de que o setor da produção de cimento é a segunda maior indústria no quesito de contribuição global de emissão de dióxido de carbono (KALIYAVARADHAN; LING, 2017). Segundo Visintin, Xie e Bennett (2020), a avaliação dos impactos de produtos cimentícios é muito relevante devido à

grande demanda desses materiais para promover o desenvolvimento das sociedades, e que por outro lado, esse precisa ser sustentável ambientalmente a longo prazo.

Quando se fala em desenvolvimento sustentável, é essencial relembrar um fator de destaque na última década para parametrização desse avanço, que são os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, ou ODS, da Organização das Nações Unidas – ONU, apresentados na Figura 1 (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022). Conforme as Nações Unidas Brasil (2022), esse documento foi criado para abordar os desafios para alcançar a garantia de que as pessoas vivam em paz e prosperidade, ao mesmo tempo em que protegem o meio ambiente. Assim, os países signatários da Agenda se comprometeram a cumprir os objetivos até 2030, como é o exemplo do Brasil.

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: Nações Unidas Brasil (2022).



Dentro do panorama da construção civil, se destacam dois dos objetivos da ODS, o consumo e produção responsáveis e a ação contra mudança global do clima. Com relação ao primeiro, se refere em síntese a assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis, como o uso eficiente de recursos naturais e a redução da geração de resíduos (BRASIL, 2022). Já a ação contra a mudança global do clima faz referência às medidas de combate às alterações climáticas, como mitigação, adaptação e redução de emissões ambientais (BRASIL, 2022).

Com base nisso, a WBCSD, ou Conselho Empresarial Mundial para Desenvolvimento Sustentável, com o intuito de colaborar para a criação de medidas que mitiguem as alterações climáticas, criou um padrão para quantificar e gerenciar as emissões atmosféricas no mundo, denominado Protocolo GHG (WBCSD, 2004). Conforme FGVCS (2008), o objetivo desse protocolo é formalizar a contabilização de emissões de gases do efeito estufa de um sistema, dentre eles o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), os hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorcarbonos (PFCs). Esse protocolo deu origem a NBR ISO 14064-1 da ABNT (2007), que relata os princípios para quantificação e elaboração de relatório de emissão de GEEs.

Por meio desse protocolo, é possível estabelecer medidas que envolvam emissões diretas de GEEs, como a queima de combustíveis fósseis, emissões indiretas, como o consumo de energia elétrica, e outras emissões do sistema, como o transporte de pessoas e de materiais (FGVCS, 2008). Assim, a partir do quantitativo de emissão de GEEs de cada etapa, conforme o autor, é possível estimar o potencial de aquecimento global do sistema como um todo, com base na transformação da emissão de cada GEE em uma emissão equivalente de  $\text{CO}_2$ . Esse dado, conforme Junqueira (2020) e Caldas (2021) é identificado como a pegada de carbono.

Quando se fala de emissões de GEEs dentro da construção civil, destacam-se dois pontos, a emissão de  $\text{CO}_2$  pela indústria cimenteira e pela necessidade de crescimento do ramo por meio da mudança do uso do solo (SEEG, 2021). Além disso, no ano de 2018, segundo relata Junqueira (2020), o setor de resíduos sólidos no Brasil (incluindo RCD) foi responsável pela geração de mais de 90 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente, valor que não teve mudança significativa no ano de 2021, conforme relatório do SEEG (2021). Assim, como destaca Junqueira (2020), a

falta de compromisso em diminuir as emissões do setor de produção de materiais e de resíduos se mostra como uma necessidade de novos olhares para a situação.

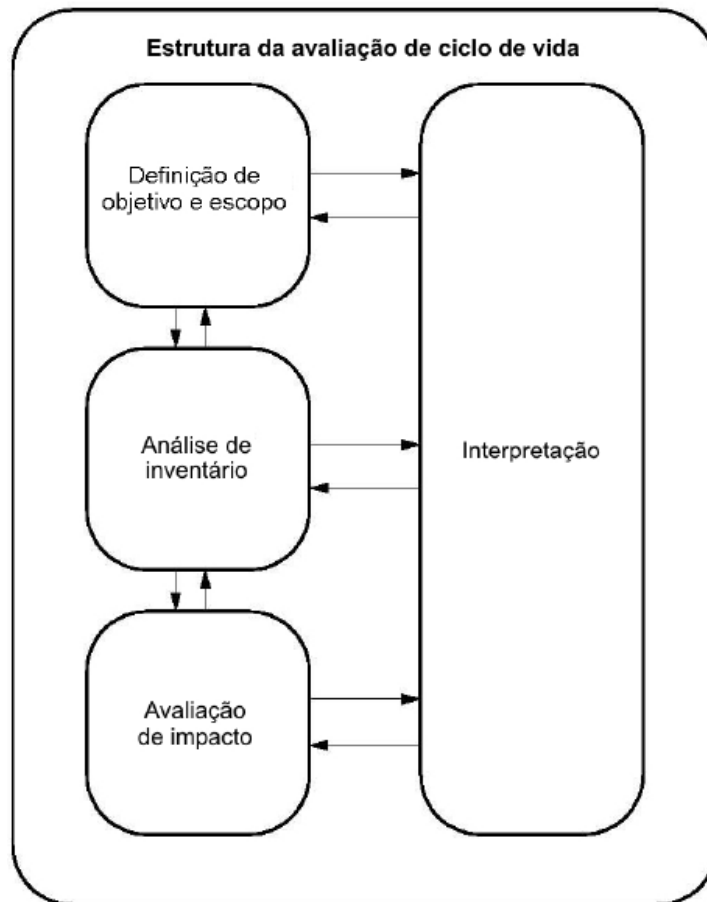
Ainda existe uma lacuna na questão de melhoria do quadro de emissões de gases do efeito estufa pela construção civil. Como destaca WBCSD (2004), para que o relatório esteja completo, é necessário estabelecer questões como ano-base, limites geográficos e organizacionais. Uma forma de identificar esses itens, segundo Junqueira (2020) e WBCSD (2011), é aliando a metodologia da pegada de carbono com um método denominado avaliação de ciclo de vida.

### 2.3. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Conforme a NBR ISO 14040 da ABNT (2009a), o ciclo de vida de um produto qualquer consiste no encadeamento de estágios e processos de forma lógica que fazem parte da obtenção de um material, englobando recursos naturais e energia, e o processamento dessas parcelas. Conforme a própria norma relata, identificado na Figura 2, a análise de ciclo de vida corresponde a análise dos dados obtidos do levantamento dos processos de produção de um determinado material, cujo conjunto de procedimentos é denominado inventário, bem como a análise do impacto ambiental gerado em cada processo elencado no inventário.

Conforme Paz (2020), a metodologia denominada avaliação do ciclo de vida permite quantificar e interpretar determinados impactos ambientais por meio da análise dos fluxos de entradas e saídas de insumos e energia de um sistema de produto ao longo de um tempo pré-definido. No Brasil, as normativas que orientam a execução do método são a NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, baseadas em normas internacionais. Conforme a NBR ISO 14040 da ABNT (2009a), a ACV dá enfoque aos potenciais impactos ambientais, como uso de recursos naturais e emissões ambientais, que correspondem a unidade funcional de um sistema de produto. As definições dos principais termos utilizados no sistema estão especificadas no Quadro 3.

Figura 2 – Estrutura básica da avaliação de ciclo de vida



Fonte: ABNT (2009a).

Quadro 3 – Glossário de termos da análise de ciclo de vida

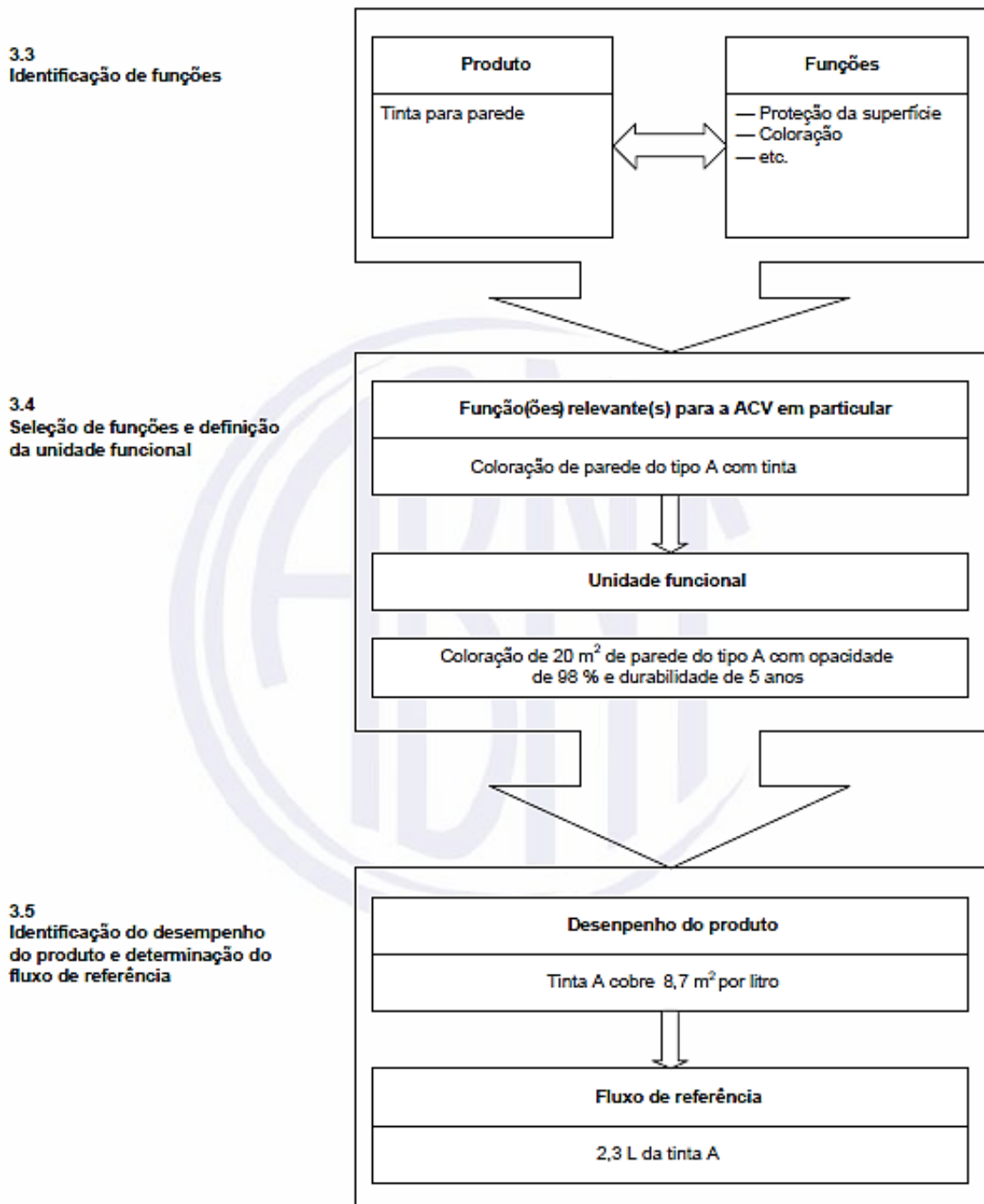
Termo	Definição
Alocação	Repartição dos fluxos de entrada e saída em subsistemas de produto, além do escopo definido;
Critérios de corte	Especificações que definem a exclusão de dados de entradas, saídas e produtos de um estudo;
Fluxo elementar	Produto retirado do meio ambiental sem interferência prévia do homem, ou produto liberado no meio ambiente sem interferência póstuma;
Fluxo de referência	Fluxo de saídas de processos com a finalidade de realização do desempenho da unidade funcional
Fronteira do sistema	Critérios que especificam a limitação de obtenção de dados de processos que compõem um sistema de produto;
Inventário do produto	Conjunto de entradas, saídas e produtos de um estudo;
Unidade funcional	Unidade de referência para desempenho quantificado de um sistema de produto

Fonte: ABNT (2009a), adaptado.

O estudo de ciclo de vida, conforme a NBR ISO 14040, é composto principalmente por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos dados obtidos, já apresentadas na Figura 2. É importante destacar que essa última não é estabelecida como uma fase formal, mas permeia as outras fases do estudo. Assim, na fase de

escopo, é necessário elencar aspectos locais, temporais e funcionais do objeto de análise, bem como definições dos impactos avaliados e justificativas para as variáveis estudadas. Essa é uma fase importante, já que é por meio desses dados que é feita a limitação da unidade funcional, do fluxo de referência e da fronteira do sistema, exemplificado na Figura 3. Além disso, deve-se salientar que a inclusão de entradas e saídas no sistema depende de características do produto abordadas nessa etapa.

Figura 3 – Exemplo da etapa de definições de escopo de um produto



Levando o inventário do produto em conta, é feita a interpretação das etapas para a avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) do objeto de estudo, conforme recomenda a NBR ISO 14044 da ABNT (2009b). Nessa fase, são analisados os impactos obtidos em cada processo do inventário, a sua relevância, e se a fronteira determinada foi adequada para o objetivo. Conforme Schafhauser (2019), nessa fase é indicada a categoria e o modelo de classificação e quantificação dos impactos, destacando-se o consumo de recursos, o aquecimento global, e a toxicidade biológica. Um exemplo de categorização seria classificar a pegada de carbono como o potencial de aquecimento global dentro da AICV.

A ACV vem se mostrando como uma metodologia interessante dentro do contexto da engenharia civil. Segundo Soares, Souza e Pereira (2006), o método tem grande eficácia em diversas etapas do processo construtivo, desde a extração de matérias-primas e a escolha de insumos, até a demolição de edifícios e a reutilização de materiais. Alguns exemplos desse tipo de estudo são a aplicação para comparação de métodos construtivos por Ramos (2019), a análise de edificações inteiras por Baiocchi (2019) e Pulgrossi (2020), até a avaliação de agregados reciclados e as possibilidades de reuso por Schafhauser (2019) e Paz (2020). Além disso, Silva (2022) relata que a avaliação de ciclo de vida tem se mostrado um item importante na obtenção de certificados ambientais por construtoras no Brasil.

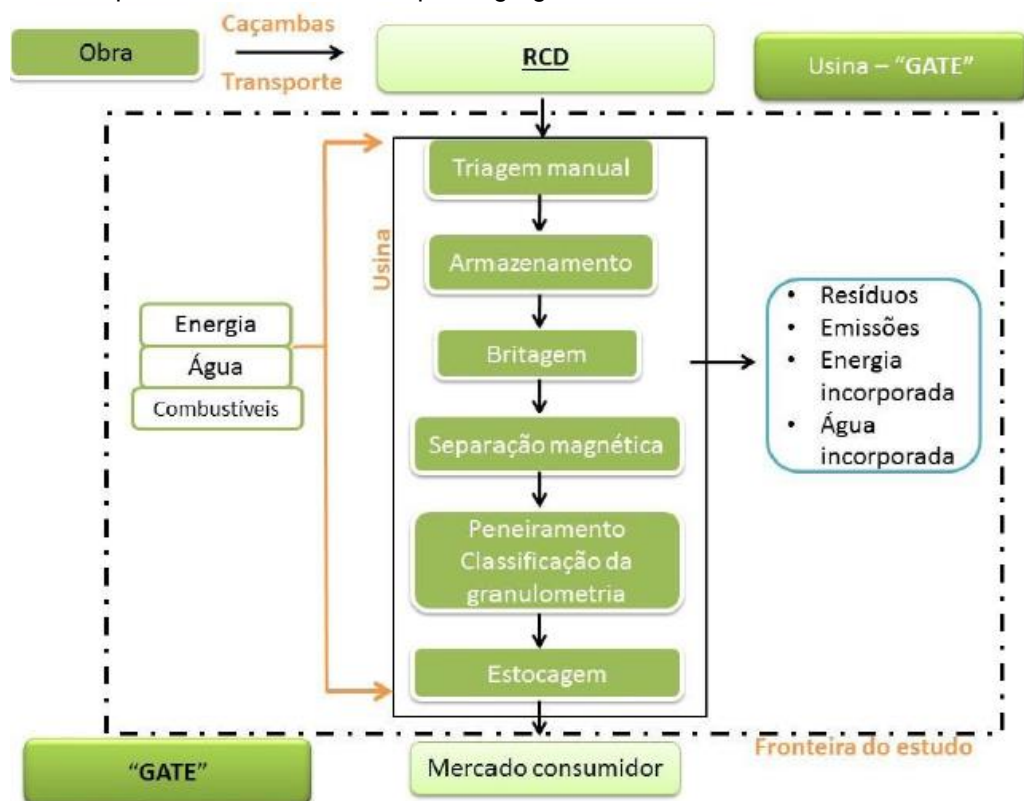
Como relatado, o estudo do ciclo de vida para agregados reciclados vem crescendo no meio acadêmico, pois, conforme Paz (2020), devido a expansão da reutilização de agregado reciclado, e considerando que toda a sua cadeia produtiva tem impactos ambientais diferentes dos relatados para a produção de agregados naturais, ainda é escassa a quantidade de informações desse tipo em bases de dados e bibliografias. Um exemplo de inventário utilizado para ACV para agregado de RCD está identificado na Figura 4, que apresenta uma proposta de análise partindo do entulho já produzido, e finaliza com o agregado comercialmente pronto para utilização.

Na imagem, Paz (2020) retrata o inventário de ciclo de vida para agregados reciclados no município de Cascavel. Na pesquisa, foram abordados os impactos ambientais com relação ao consumo de energia e água, e com relação a geração de resíduos e de CO<sub>2</sub>, para 1m<sup>3</sup> do material seco classe A, sendo essa a unidade funcional. O estudo se refere a uma fronteira que inicia na chegada do resíduo na



central de beneficiamento, e finaliza com o potencial consumido final, durante o período de um ano, dentro do próprio limite da cidade de Cascavel. A autora exclui a necessidade de alocação, já que os subprodutos de resíduos classe B e C não foram levados em conta.

Figura 4 – Exemplo de inventário de ACV para agregado reciclado



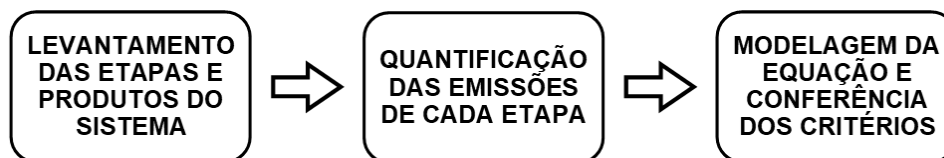
Fonte: PAZ (2020).

Desse modo, há a necessidade de propor uma análise de ciclo de vida para o agregado de RCD, levando em consideração a complexidade de sua composição e dos seus processos produtivos. Porém, conforme destaca Paz (2020), a técnica tradicional de ACV é complexa e demanda recursos. Assim sendo, a simplificação desse processo vem ganhando destaque no cenário acadêmico.

### 3. METODOLOGIA

O objetivo dessa pesquisa é propor um método numérico empírico para análise da emissão de gases do efeito estufa de agregado de resíduo de construção e demolição para pavimentação por meio de um processo de ACV direto. A proposta de uma metodologia numérica para análise de ciclo de vida de emissão de carbono de agregado reciclado para pavimentação foi estruturada em três etapas, conforme apresentado na Figura 5: a determinação das etapas e produtos do sistema do resíduo, denominado escopo e inventário, a quantificação da emissão de CO<sub>2</sub> em cada entrada e saída do sistema e a modelagem da equação e conferência e interpretação dos critérios adotados. Todas as etapas foram feitas baseando-se em metodologias semelhantes às já apresentadas por outros pesquisadores, que foram replicadas para o presente estudo, e em critérios de aplicação determinados nas normas vigentes. Além disso, cada etapa conta com sua própria análise, interpretação e justificativa dos dados obtidos.

Figura 5 – Fluxograma da elaboração da metodologia de emissão de CO<sub>2</sub>



Fonte: Autoria própria.

#### 3.1. DETERMINAÇÃO DO ESCOPO E INVENTÁRIO DE PRODUTO

A determinação do escopo do produto foi feita conforme NBR ISO 14040 da ABNT (2009a). É nessa etapa onde são definidas as razões de estudo, a profundidade da pesquisa e aspectos de funcionalidade e aplicação do produto estudado. Essa ACV partiu do princípio de que será estudado o caso de agregado advindo de resíduos de concreto beneficiado para a utilização em base e sub-base de pavimentos. Para completa definição dos itens necessários para validação do objetivo, escopo e avaliação do impacto do produto conforme normatização foi utilizada a ficha exemplificada no Quadro 4, cujos dados a serem preenchidos se basearão em bibliografias complementares. Ademais, os aspectos específicos da interpretação das etapas relacionadas anteriormente, bem como a ficha

catalográfica para análise de ciclo de vida do agregado de RCD, serão detalhados no item 4.

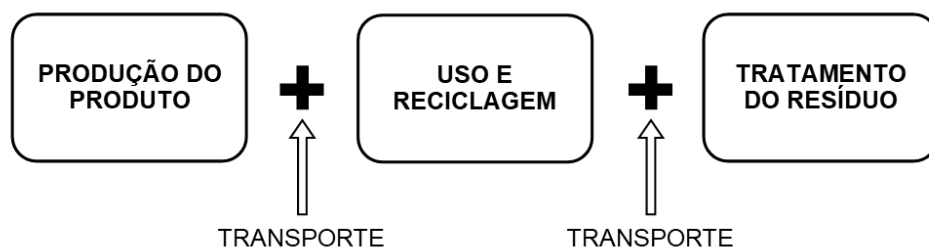
Quadro 4 – Ficha catalográfica de produto para avaliação de ciclo de vida

Etapa	Sub-Etapa	Consideração
Definição do objetivo e escopo	Objetivo do estudo	Aplicação
		Público-alvo
	Escopo do estudo	Sistema de produto
		Funções do sistema
		Unidade funcional
		Fronteira do sistema
		Alocação
		Categoria, metodologia e interpretação de impacto
		Requisitos de dados
		Pressupostos
		Limitações
		Tipo e formato de relatório
Análise de inventário de ciclo de vida	Coleta de dados	Entradas de energia e matéria-prima
		Produtos
		Emissões atmosféricas, para água e solo

Fonte: Paz (2020), adaptado

Já a determinação de todos os aspectos do inventário do agregado reciclado também foi feita em conformidade a NBR ISO 14040 da ABNT (2009a), exemplificada para situações da construção civil na Figura 6, seguindo uma metodologia geral, apresentada na Figura 7.

Figura 6 – Processos considerados no inventário de ACV para construção civil

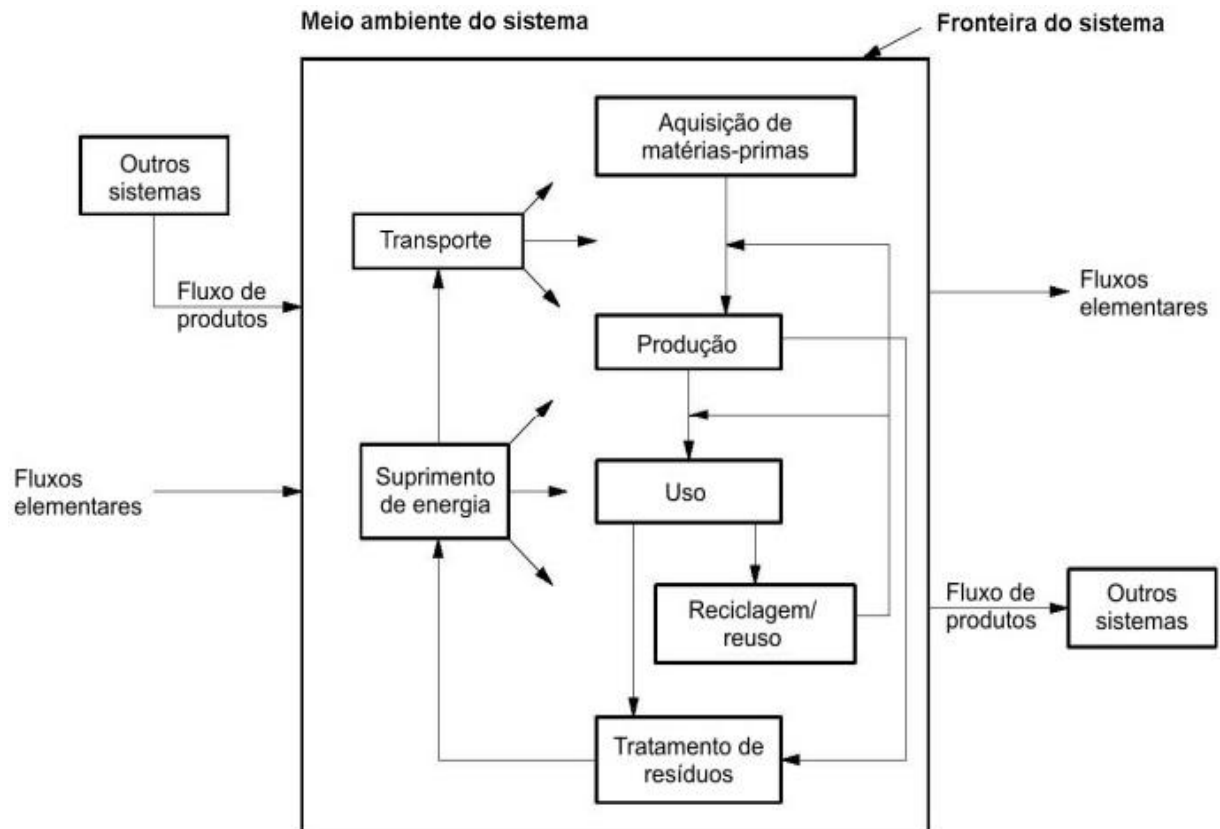


Fonte: Autoria própria.

Para isso, utilizou-se de dados de bibliografias complementares, levando em consideração as recomendações de estágios de processo da normatização. Desse modo, os principais aspectos a serem considerados na escolha do agregado são a sua composição e a sua granulometria, fatores que influenciam na determinação de processos do inventário, cujos dados serão obtidos em bibliografias

complementares. Além disso, devido a caracterização da ACV, esse inventário foi feito de berço a portão, ou seja, a sua fronteira se iniciará na extração da matéria prima e finalizará na conclusão do beneficiamento, em que os processos adotados também se basearão em bibliografias relacionadas.

Figura 7 – Metodologia para obtenção do inventário



Fonte: ABNT (2009a).

### 3.2. QUANTIFICAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO

Com relação ao impacto ambiental avaliado na presente pesquisa, trata-se nesse caso da emissão de gases do efeito estufa, representada pela pegada de carbono. Assim, a pegada de carbono, que mede o potencial de aquecimento global (PAG 100) gerado em cada etapa do sistema definida anteriormente, foi determinada conforme a recomendação da NBR ISO 14040 da ABNT (2009a), que trata da quantificação do impacto ambiental selecionado para a ACV. O impacto em questão é classificado como contribuição para mudança climática na norma, podendo ser identificado como capacidade de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente,

considerando todos os gases responsáveis pelo efeito estufa, em um horizonte de 100 anos, cujos valores de PAG 100 estão apresentados na

Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores de potencial de aquecimento global em 100 anos

Gás	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	SF <sub>6</sub>	R-410 <sup>a</sup>
PAG 100	1	25	298	22800	16

Fonte: FGVCES (2016), modificado.

A partir da correlação desses valores, orientado pelo relatório da WBCSD (2011), determina-se a emissão em kg de CO<sub>2</sub> equivalente total de cada etapa do inventário. Esse relatório recomenda a abordagem de emissão e remoção atmosférica a partir de uma visão de interações biogênicas ( $E_{CO_2bio}$  e  $R_{CO_2bio}$ ), não biogênicas ( $E_{CO_2n\tilde{a}o-bio}$  e  $R_{CO_2n\tilde{a}o-bio}$ ) e de mudança de uso de solo ( $E_{CO_2mud}$ ), conforme Equação (1).

$$Total_{CO_2equ} = E_{CO_2bio} - R_{CO_2bio} + E_{CO_2n\tilde{a}o-bio} - R_{CO_2n\tilde{a}o-bio} + E_{CO_2mud} \quad (1)$$

É importante destacar nesse ponto que, para a presente pesquisa, não foram considerados valores de dióxido de carbono advindos de atuações biogênicas e de mudança de uso de solo. Assim, para a determinação da capacidade de emissão de CO<sub>2</sub>, foram utilizadas duas fontes para coleta de dados de emissão de GEEs, a base de dados openLCA da GreenDelta© (2006) e outras bibliografias que abordam o assunto. Essa base de dados foi utilizada somente para coleta de dados de emissões atmosféricas. Desse modo, se o produto já tiver sido cadastrado na base de dados, ele será contabilizado conforme a proporção de material indicada no inventário. Caso o produto não tenha sido cadastrado, a quantidade de emissões atmosféricas gerada na etapa será feita em conformidade ao relatado em outros itens da base de dados e também em dados da bibliografia complementar.

### 3.3. ELABORAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO

A partir do quantitativo de geração de CO<sub>2</sub> equivalente do agregado reciclado para pavimentação, seguindo os princípios indicados no item 4, foi feita a

padronização dos valores, baseado na proporção de emissão de CO<sub>2</sub> de cada etapa do inventário com relação ao valor total. No caso da metodologia empírica, diferente do método completo da ACV, ela usa dados de pesquisas relacionadas ao tema para identificar padrões e determinar parâmetros numéricos fixos para a emissão de cada etapa relacionada, evitando a medida de valores em campo e o estudo personalizado, que demandaria muitos recursos, tornando o processo de uma aplicação de ACV, em um contexto semelhante ao da presente pesquisa, mais direto.

Desse modo, objetiva-se a obtenção de uma equação numérica a partir de informações de bases de dados e de análises numéricas do resíduo, a partir da tabulação dos dados em planilha eletrônica. Para isso, se utilizará dos processos abordados na Equação (2), baseado na metodologia da pegada de carbono, de modo que a emissão equivalente será representada pela soma da emissão de CO<sub>2</sub> em cada processo, sendo eles a produção do resíduo ( $E_{CO_2produ}$ ), o transporte do material ( $E_{CO_2trans}$ ) e o processamento do resíduo ( $E_{CO_2proce}$ ), multiplicado pela grandeza de referência de medição dessa etapa (variáveis de distância  $S$  e de unidade de beneficiamento  $un$ ). Desse modo, qualquer que tenha sido a composição do RCD analisado, ou o local em que ele tenha sido gerado, ainda assim a equação poderá determinar a emissão em kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> de agregado.

$$E_{CO_2equiv} = E_{CO_2produ} + E_{CO_2trans} \cdot S + E_{CO_2proce} \cdot un \quad (2)$$

#### 4. ESCOPO E INVENTÁRIO

Quadro 5 – Ficha catalográfica de ACV do agregado reciclado para pavimentação

Etapa	Sub-Etapa	Consideração	Conteúdo
Definição do objetivo e escopo	Objetivo do estudo	Aplicação	Pesquisa acadêmica para obtenção de uma metodologia para avaliação de ciclo de vida de agregado reciclado para pavimentação, com relação à pegada de carbono
		Público-alvo	Comunidade acadêmica
	Escopo do estudo	Sistema de produto	Obtenção da matéria prima, produção do concreto e produção do agregado reciclado
		Funções do sistema	Material reciclado com reutilização em base e sub-base para pavimentos
		Unidade funcional	Metro cúbico de agregado seco
		Fronteira do sistema	Berço à portão, no período de um ano, no município de geração do resíduo
		Alocação	Não se aplica
		Categoria, metodologia e interpretação de impacto	Inventário de ciclo de vida, focado em emissão de GEEs e pegada de carbono
		Requisitos de dados	Obtenção de dados por meio de bases de dados e bibliografias complementares
		Pressupostos	Padronização da emissão direta de GEEs e de emissões indiretas, principalmente por consumo de energia
		Limitações	Carência de dados locais
Tipo e formato de relatório	Monografia que abordará dados, metodologias e limitações		
Análise de inventário de ciclo de vida	Coleta de dados	Entradas de energia e matéria-prima	Obtenção de dados em bases e bibliografias dentro da fronteira do sistema com relação a utilização de equipamentos elétricos e transporte por veículos
		Produtos	Agregado reciclado advindo de concreto
		Emissões atmosféricas, para água e solo	Emissão de gases do efeito estufa e consequente pegada de carbono

Fonte: Autoria própria.

Determinou-se como o objetivo desta avaliação de ciclo de vida a análise dos impactos ambientais de agregado reciclado para pavimentação, focando na emissão de gases do efeito estufa e na pegada de carbono, cujas características essenciais para prosseguimento da pesquisa estão relatadas no Quadro 5. Assim, dentre todas as categorias de impacto previstas na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a),

optou-se pela análise de mudanças climáticas devido ao fato de que o setor tem grande contribuição na questão citada, de modo que a questão necessita de avaliação para o correto gerenciamento dos processos, evitando e mitigando emissão de GEEs.

A partir disso, a fronteira do cenário desse estudo passa pela produção do concreto, por sua demolição e futuro beneficiamento, cujas etapas serão detalhadas no item a seguir. Além disso, outras características da fronteira envolvem a produção do material unicamente no município de utilização do agregado e a consideração de maquinários padrões durante os processos. Fez-se a escolha da análise de agregado reciclado para a pavimentação por conta de sua importância no mercado de RCD (MELO *et al.*, 2021). Devido a características do próprio material, optou-se pela análise somente de resíduo de estruturas de concreto, já que a análise de materiais cerâmicos tornaria o estudo complexo, fugindo do escopo da pesquisa. Além disso, a fronteira também é delimitada temporalmente por dados de emissão de GEEs e consumo de materiais e equipamentos obtidos no último ano, já que esse tipo de informação é mensurada anualmente, e pode mudar no decorrer dos anos

Nessa análise será considerado apenas a utilização de CP II F-32 na mistura de concreto, e não será levada em conta a utilização de aditivos, devido à complexidade do estudo, a qual não seria compatível com o escopo do trabalho. Essas escolhas de composição impactam diretamente nos índices de emissão de GEEs relacionados à estrutura de origem do RCD, já que composições diferentes, como utilização de pozolanas, levariam à variação da emissão de CO<sub>2</sub> equivalente dessa etapa (SANTORO; KRIPKA, 2016). Vale destacar que a partir disso, foram analisados, principalmente, concretos convencionais com resistências entre 20 MPa e 35 MPa, que constituem principalmente utilizações não estruturais e residenciais de pequeno a médio porte.

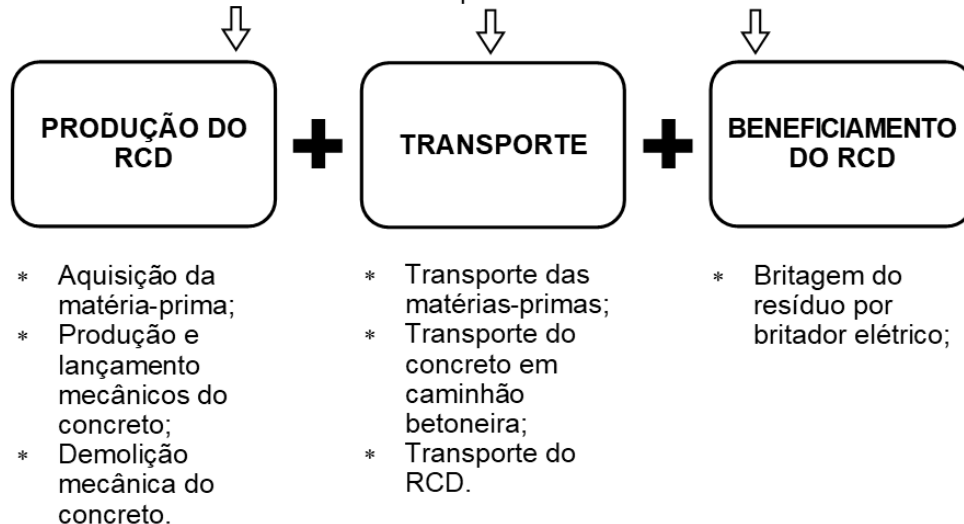
#### 4.1. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Assim, os processos escolhidos para compor o sistema de produção do agregado reciclado para pavimentação estão descritos na Figura 8. Conforme apresentado, na etapa de processamento do concreto, optou-se pela execução da mistura em usina de concreto, bem como a concretagem por processos mecânicos à



combustão, devido a difusão desse processo comparado aos métodos manuais (SIQUEIRA *et al*, 2018). Além disso, também se optou pela demolição mecânica à combustão, pelos mesmos fatores indicados para a concretagem. E por fim, para o beneficiamento, fez-se a escolha da utilização somente do britador elétrico, já que a principal característica do resíduo para utilização em base e sub-base de pavimentos é a demanda por diâmetros menores, mas sem a necessidade de peneiramento (PAZ, 2020). O inventário do processo em si está apresentado na Figura 9.

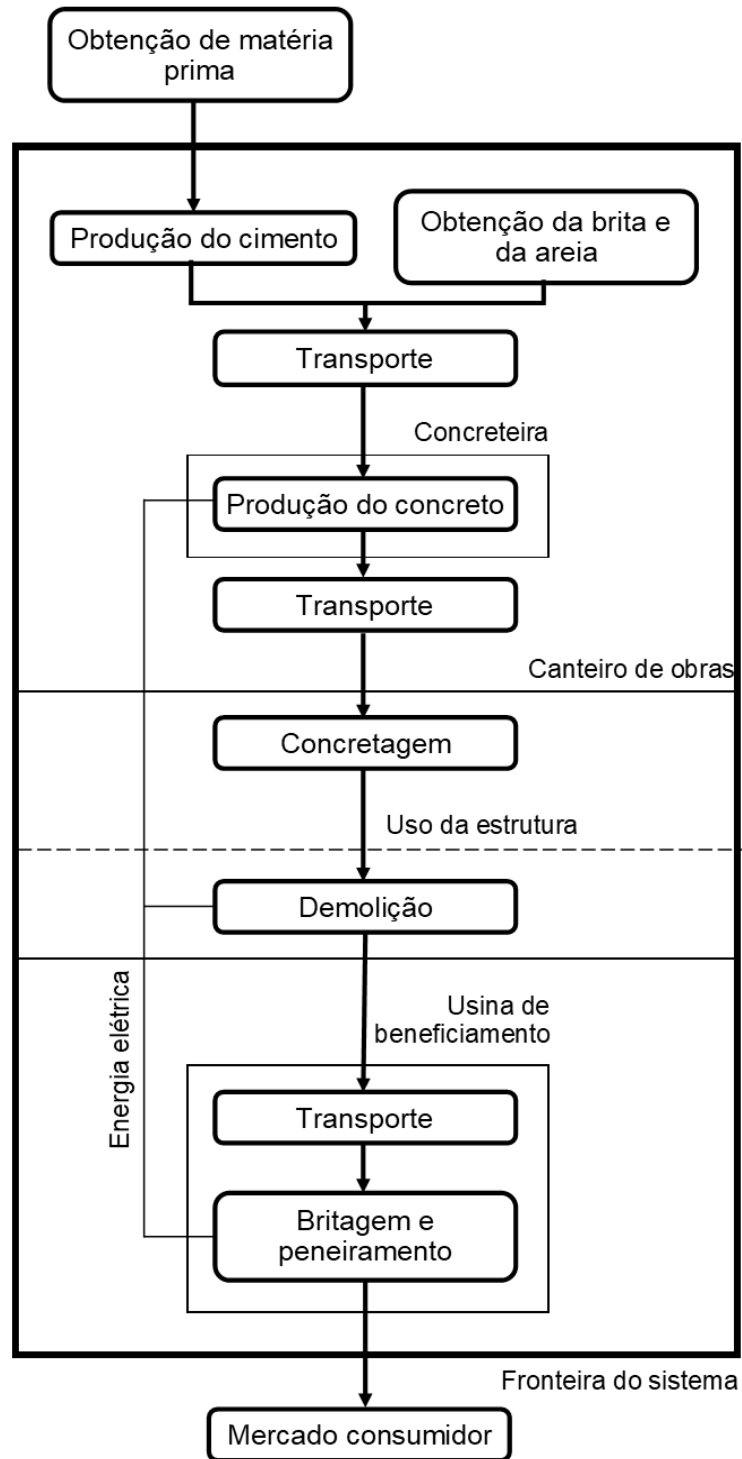
Figura 8 – Processos elencados para o ICV do agregado reciclado para pavimentação  
Conferência da replicabilidade do método



Fonte: Autoria própria.

Conforme ao relatado para os itens de composição do material, a escolha de outros equipamentos durante o processamento influenciaria na utilização de combustíveis fósseis ou de energia elétrica, levando a outros índices de emissão de gases do efeito estufa. Vale lembrar que caso fossem utilizadas metodologias manuais de produção e demolição do concreto, a quantificação das emissões atmosféricas passaria pela subjetividade da produção humana, característica que geralmente não é levada em conta em avaliações de impacto ambiental, devido à dificuldade de sua análise. Além disso, devido as próprias características do sistema, que conta com uma única linha de análise, obtendo um único produto que será estudado, não será necessário o processo de alocação no sistema, que, conforme Zhang *et al.* (2019) seria a avaliação de mais de uma linha de produção em um sistema com mais de um produto.

Figura 9 – Inventário de ciclo de vida de agregado reciclado de concreto para pavimentação



Fonte: Autoria própria.

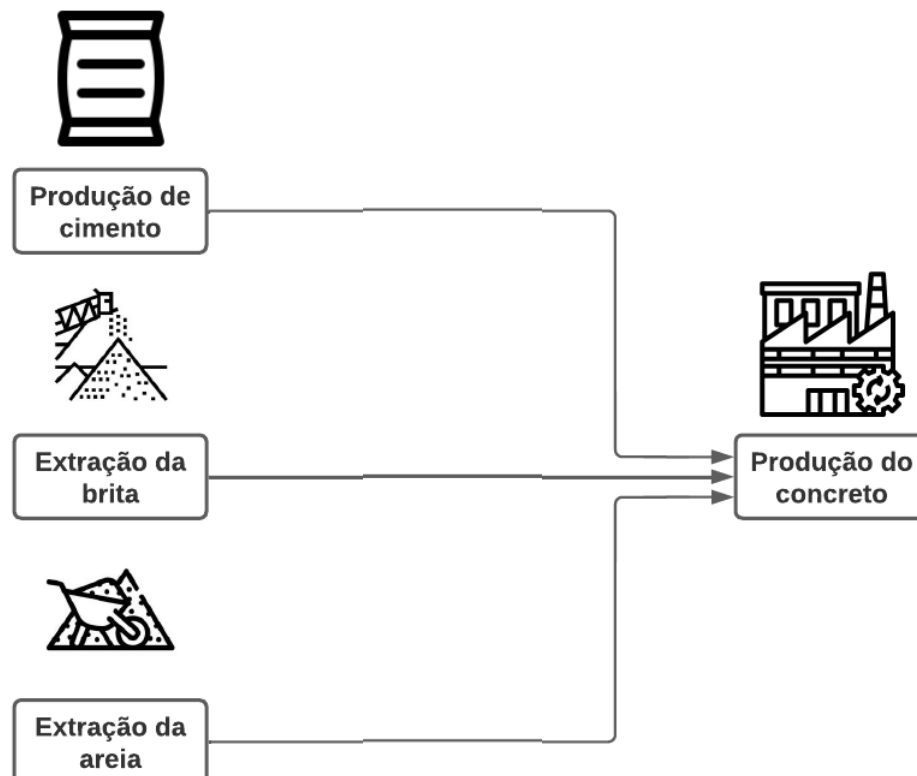
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. MODELAGEM DA EQUAÇÃO

Primeiramente, a elaboração do método numérico corresponde à obtenção direta da emissão de CO<sub>2</sub> equivalente no processamento de 1 m<sup>3</sup> de resíduo para utilização em pavimentos. Esse método é baseado principalmente nos processos adotados para o inventário de ciclo de vida, e é composto de três partes, conforme Equação (3): a produção do concreto para geração do RCD em questão (cuja emissão de GEEs é denominada  $E_{CO_2produ}$ ), o transporte de materiais ao longo do processo (cuja emissão de GEEs é denominada  $E_{CO_2trans}$ , e a distância total de transporte do concreto para obra e do resíduo para a central é denominada  $S_T$ ), e o beneficiamento do resíduo em usina de tratamento (cuja emissão de GEEs é denominada  $E_{CO_2benef}$ , e o diâmetro do agregado reciclado após o beneficiamento é denominado  $d_{méd}$ ), conforme apresentado abaixo.

$$E_{CO_2equiv} = E_{CO_2produ} + E_{CO_2trans} \cdot S_T + E_{CO_2benef} \cdot d_{méd} \quad (3)$$

Figura 10 – Etapas de produção do concreto em concreteira



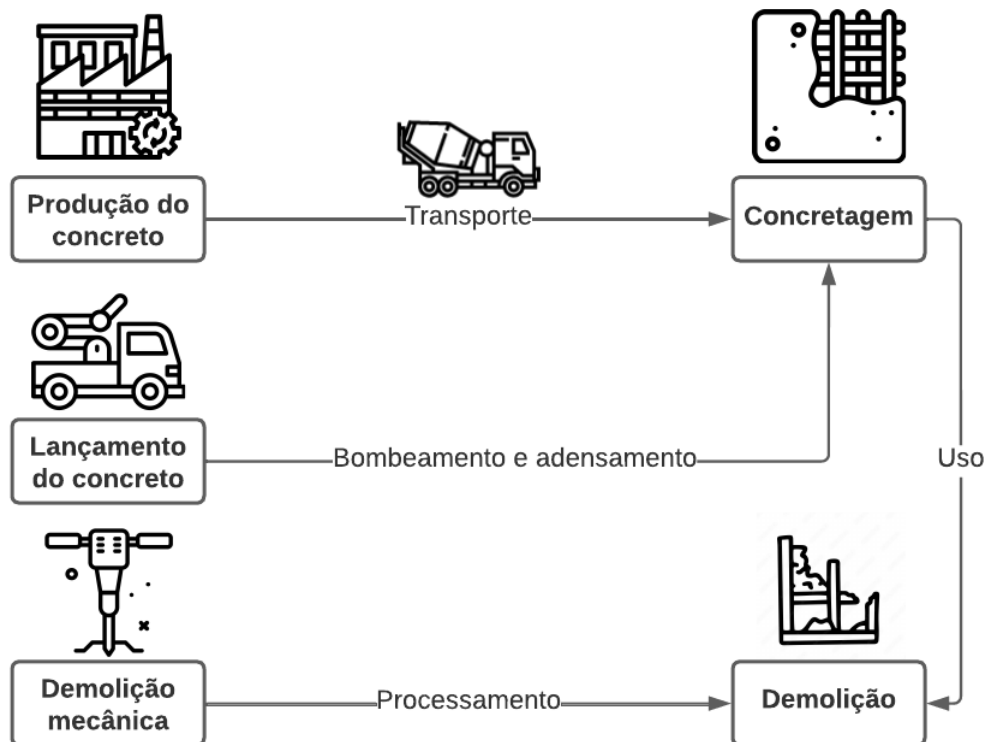
Fonte: Autoria própria.

Com relação à primeira etapa, descrita na Figura 10, segundo o raciocínio a seguir, constitui-se da composição de 1 m<sup>3</sup> de resíduo em percentual de cimento, brita e areia (denominadas *cim*, *bri* e *are*, em kg/m<sup>3</sup>) multiplicando suas respectivas emissões gasosas (denominadas  $E_{cim}$ ,  $E_{bri}$  e  $E_{are}$ , em kgCO<sub>2</sub>/kg), denominada como  $E_{CO_2concr}$ , representada pela Equação (4). O traço em questão será obtido por meio da análise da relação entre traços e resistências, considerando que o entulho gere um empolamento de 30% (DAE, 2014). Além disso, também é levada em consideração a emissão de gases advindo do uso de energia elétrica (denominada  $E_{CO_2eletr}$ , em kgCO<sub>2</sub>/kWh), demonstrado na Figura 11, bem como o consumo de usinagem, de bomba-lança, de vibrador e de martetele para a produção e demolição deste concreto, respectivamente (denominadas  $\alpha_{usin}$ ,  $\alpha_{bomb}$ ,  $\alpha_{vibr}$  e  $\alpha_{mart}$ , em kWh/m<sup>3</sup>). Ambas as etapas estão identificadas na Equação (5).

$$E_{CO_2concr} = cim \cdot E_{cim} + bri \cdot E_{bri} + are \cdot E_{are} \quad (4)$$

$$E_{CO_2produ} = E_{CO_2concr} + E_{CO_2eletr} \cdot (\alpha_{usin} + \alpha_{bomb} + \alpha_{vibr} + \alpha_{mart}) \quad (5)$$

Figura 11 – Etapas de concretagem, uso e demolição do concreto em obra



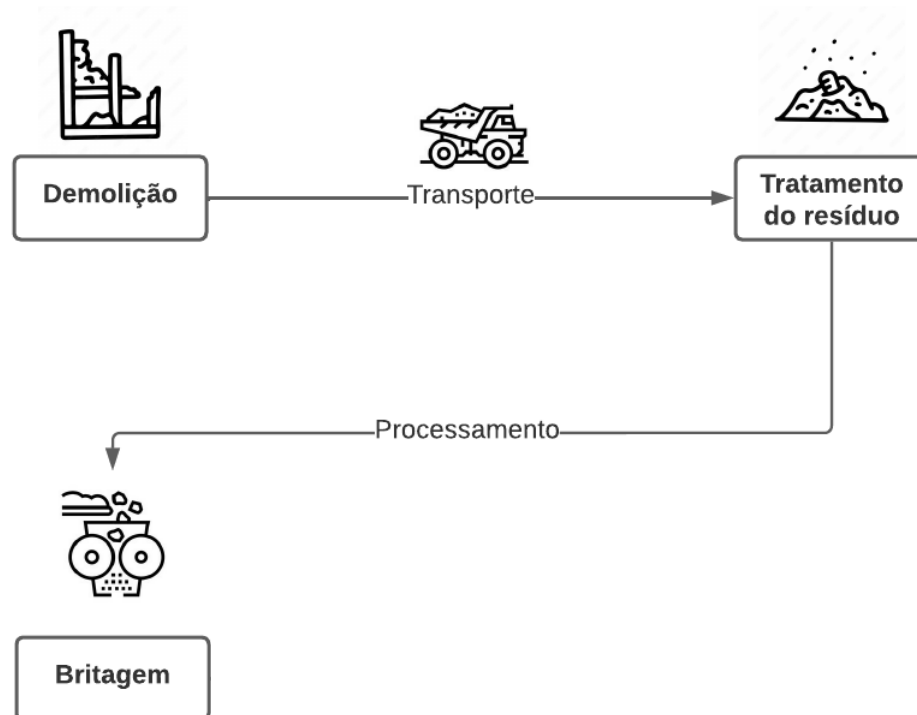
Fonte: Autoria própria.

Por fim, a última etapa, demonstrada na Figura 12 e na Equação (6), constitui-se da britagem do resíduo na central de beneficiamento, em equipamentos elétricos, que emitem gases devido ao consumo de eletricidade (cujo dado é representado por  $E_x$ , em  $\text{kgCO}_2/\text{h}\cdot\text{m}^3$ ). A parcela de emissão pelo consumo de energia multiplica a demanda do britador para determinado diâmetro de agregado reciclado requerido (denominada  $x$ , em  $\text{h}/\text{d}_{\text{méd}}$ ). Além disso, conforme Equação (7), a emissão durante o transporte, que permeia todas as etapas, é composta pela proporção de caminhão, e conseqüente uso de combustível, que é necessária para o transporte de  $0,77 \text{ m}^3$  de concreto e de  $1 \text{ m}^3$  de resíduo (denominadas  $\beta_{\text{con}}$  e  $\beta_{\text{res}}$ , em  $\text{L}/\text{km}$ ), consumos esses devido ao empolamento do resíduo, considerando que um caminhão pode transportar de 6 a  $8 \text{ m}^3$  de material. Esta demanda de caminhão é multiplicada pela emissão de gases do efeito estufa do consumo de combustíveis fósseis (essa emissão é denominada  $E_\beta$ , em  $\text{kgCO}_2/\text{L}$ ).

$$E_{CO_2\text{benef}} = x \cdot E_x \quad (6)$$

$$E_{CO_2\text{trans}} = (\beta_{\text{con}} + \beta_{\text{res}}) \cdot E_\beta \quad (7)$$

Figura 12 – Etapas de tratamento do resíduo na usina de beneficiamento



Fonte: Autoria própria.

### 5.1.1. Índices adotados para o modelo numérico

Determinaram-se valores numéricos para as características relacionadas à composição e ao processamento do agregado para pavimentação. Em primeiro lugar, definiram-se as proporções de cimento e agregados utilizadas para a produção do concreto, e conseqüente produção do resíduo. Para isso, foram estabelecidas correlações entre traços de dosagem de concreto padrões e a resistência à compressão do material, cuja informação será utilizada para determinar a pegada de carbono para a produção do concreto por meio da resistência mecânica da estrutura demolida, conforme já relatado anteriormente. Assim, a Tabela 2 identifica os valores adotados, lembrando que foram escolhidos agregados convencionais e a utilização de CP II F-32, e que a tabela não apresenta valores com coeficiente de empolamento.

Tabela 2 – Faixa de traços de concreto padrões por resistência à compressão aos 28 dias

Classe do Concreto	Faixa de resistência à compressão a 28 dias (MPa)	Traço (Cimento:Areia:Brita)	Consumo de materiais para 1m <sup>3</sup> de concreto (kg/m <sup>3</sup> )
-	fck<15	1:2,94:3,80	277,55:816,00:1054,69
C15	15≤fck<20	1:2,53:3,07	337,08:852,81:1034,84
C20	20≤fck<25	1:2,32:2:70	371,50:861,88:1003,05
C25	25≤fck<30	1:2,08:2,61	402,89:838,01:1051,54
≥C30	30≤fck	1:1,42:2,17	492,97:700,02:1069,74

Fonte: Cabral (2007), Huamani e Chanca (2018), Luo *et al* (2018), Maciel, Coelho e Pereira (2020), Pereira (2022), modificado

Para a concretagem e demolição foram utilizados dados de utilização de equipamentos conforme os relatórios analíticos de composição do SINAPI, referência de setembro de 2022 (CAIXA, 2022) e do SICRO, referência de julho de 2022 (DNIT, 2022), apresentados na Tabela 3. Para esta análise foram considerados usinagem capaz de processar entre 40m<sup>3</sup>/h e 90m<sup>3</sup>/h, bomba-lança com capacidade entre 40m<sup>3</sup>/h e 50m<sup>3</sup>/h, vibrador de imersão com potência entre 1,5KW e 4KW e martetele demolidor com especificação entre 25kg e 28kg. Além disso, foram estabelecidos caminhões padrões com capacidade de 8m<sup>3</sup> para o transporte, com consumo de combustível de 0,4 L/km, em conformidade ao que relata Paz (2020). Por fim, para a britagem do resíduo, utilizou-se de índices

conforme relatórios técnicos de equipamentos comerciais, de modo que a capacidade de britagem obtida está indicada na Figura 13, e o consumo final de energia é dado pela Equação (8), em kWh. Para elaboração da relação identificada na equação, foi realizada uma regressão linear com auxílio de tabelas automáticas, considerando os valores de consumo relatados no gráfico da Figura 13, e valores de potência entre 2,2 kW, 7,5 kW, 22,5 kW e 61 kW, obtidos pelas planilhas de composição relatadas anteriormente.

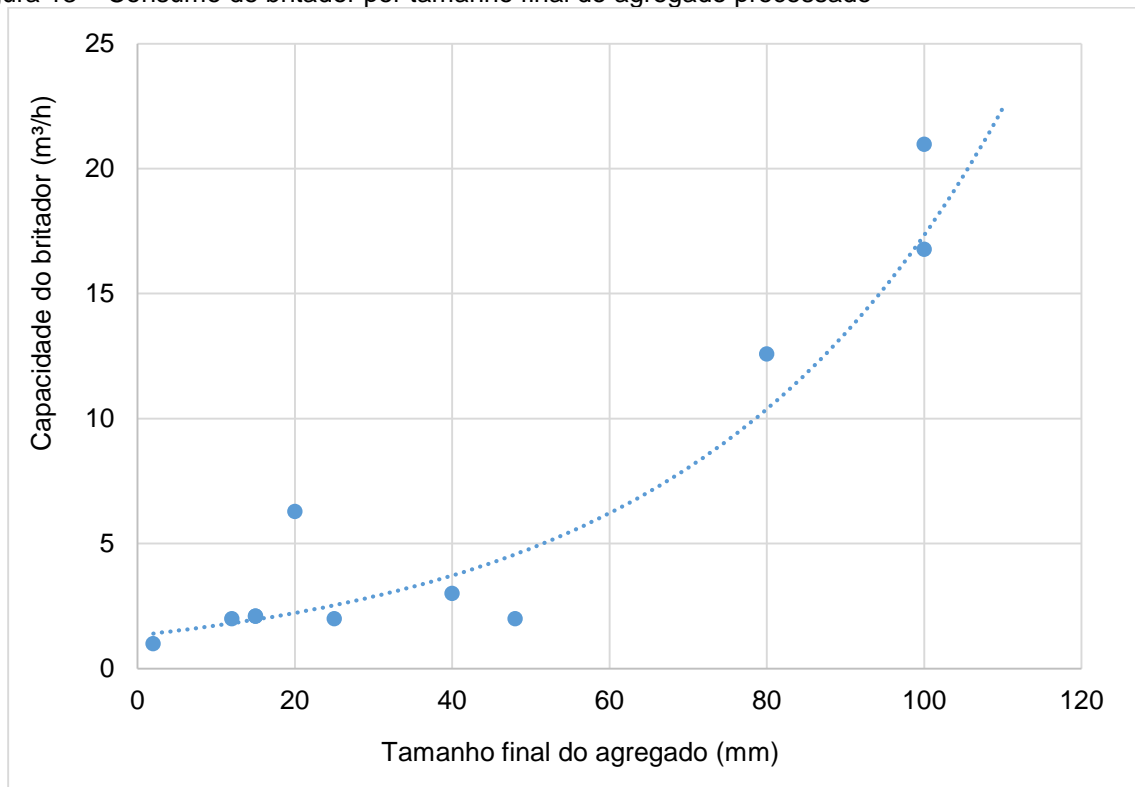
$$c_{(kWh)} = -0,0327 \cdot d_{(mm)} + 4,5899 \quad (8)$$

Tabela 3 – Índices de consumo de equipamentos para produção e demolição de concreto

Índice	Usinagem	Bomba-lança	Vibrador de imersão	Martelete demolidor
Utilização (h/m <sup>3</sup> )	0,02096	0,02681	0,10256	2,31471
Consumo de energia (KWh)	1,84450	2,81476	0,28203	62,49730

Fonte: Caixa (2022), DNIT (2022), modificado.

Figura 13 – Consumo de britador por tamanho final do agregado processado



Fonte: Agostini Industrial (2022), CSM (2022), Komplet (2022), Rubblecrusher (2022), modificado.

## 5.2. EMISSÃO DE GEE'S

Com relação ao modelo final da equação e os valores de emissão de gases do efeito estufa, deve se salientar que os valores de emissão de GEEs, dentre eles CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e SF<sub>6</sub>, foram determinados para cada uma das etapas já citadas. As etapas foram classificadas em produção de cimento, produção de agregado graúdo, produção de agregado miúdo, uso de combustíveis fósseis e uso de energia elétrica, cujos valores adotados apresentam-se na Tabela 4. Para obtenção desses valores, foram utilizadas bibliografias complementares, bem como a base de dados de ACV gratuita openLCA, cuja interface de utilização está representada na Figura 14, exemplificando informações utilizadas como emissão de GEEs, nesse caso da produção de cimento, demarcadas em vermelho.

Tabela 4 – Índices de emissão de GEE's por etapa de produção do agregado reciclado

Emissão	Cimento (kg/kg)	Agregado miúdo (kg/kg)	Agregado graúdo (kg/kg)	Combustíveis fósseis (kg/L)	Energia elétrica (kg/kWh)
CO <sub>2</sub>	23,43815	0,25273	0,26134	4,43384	0,11575
CH <sub>4</sub>	0,00021	1,70748·10 <sup>-5</sup>	1,84770·10 <sup>-5</sup>	0,00269	-
N <sub>2</sub> O	1,79060·10 <sup>-5</sup>	2,01790·10 <sup>-6</sup>	1,95026·10 <sup>-6</sup>	5,38232·10 <sup>-5</sup>	-
SF <sub>6</sub>	1,05052·10 <sup>-7</sup>	1,50337·10 <sup>-7</sup>	6,13376·10 <sup>-7</sup>	1,56792·10 <sup>-7</sup>	-
CO <sub>2eq</sub>	23,45113	0,25410	0,26378	4,52060	0,11575

Fonte: GreenDelta (2006), Ministério do Meio Ambiente (2014), Paz (2020), Sanqueta *et al.* (2017), modificado.  
Nota: Caso o parâmetro não fosse encontrado, sua representação seria somente com um "-".

Figura 14 – Interface da base de dados openLCA

The screenshot shows the openLCA 1.11.0 interface. The main window displays the impact analysis for 'Cement, lime and plaster - BR'. The impact assessment method is set to 'CML, 2001 - baseline'. A table lists the impact categories and their amounts. The 'global warming (GWP)' category is expanded, and a red box highlights the following data:

Name	Category	Amount
CO <sub>2</sub> - non combus	Emission to air/unspecified	22.07690 kg
CO <sub>2</sub> - non combus	Emission to air/unspecified	2.05301 kg
CO <sub>2</sub> - combustion	Emission to air/unspecified	1.36125 kg
N <sub>2</sub> O - combustion	Emission to air/unspecified	1.79060E-5 kg
CH <sub>4</sub> - combustion	Emission to air/unspecified	0.00021 kg
SF <sub>6</sub>	Emission to air/unspecified	1.05052E-7 kg

Fonte: GreenDelta (2006).



A partir dos dados de emissão de gases e de consumo, foi possível determinar os parâmetros de cálculo, identificados no Quadro 6, bem como a Equação (9) para o cálculo de emissão de GEEs em função da resistência do concreto demolido, do diâmetro desejado para o agregado reciclado e das distâncias de transporte entre a concreteira, a obra e a central de beneficiamento, conforme processo relatado no Apêndice A. Além disso, a variável que relaciona a resistência do concreto e sua composição com a pegada de carbono, denominada  $E_{CO_2concr}$ , é obtida por meio da

Tabela 5, tendo que, para 1 m<sup>3</sup> de resíduo, considerou-se 76,92% do consumo de materiais e equipamentos para produzir 1m<sup>3</sup> de concreto.

Quadro 6 – Parâmetros adotados para modelagem da equação

Parâmetro	Símbolo	Valor adotado
Consumo de cimento	$cim$	Tabela 2, considerado empolamento de 30%
Pegada de carbono da produção de cimento	$E_{cim}$	23,45113 kgCO <sub>2</sub> eq/kg
Consumo de brita	$bri$	Tabela 2, considerando empolamento de 30%
Pegada de carbono da extração da brita	$E_{bri}$	0,26378 kgCO <sub>2</sub> eq/kg
Consumo de areia	$are$	Tabela 2, considerando empolamento de 30%
Pegada de carbono da extração da areia	$E_{are}$	0,25410 kgCO <sub>2</sub> eq/kg
Pegada de carbono da produção do concreto	$E_{CO_2concr}$	Tabela 5, considerando empolamento de 30%
Pegada de carbono do consumo de energia elétrica	$E_{CO_2eletr}$	0,11575 KgCO <sub>2</sub> eq/KWh
Consumo de central de usinagem	$\alpha_{usin}$	1,84450 kWh/m <sup>3</sup>
Consumo de bomba-lança	$\alpha_{bomb}$	2,81476 kWh/m <sup>3</sup>
Consumo de vibrador de imersão	$\alpha_{vibr}$	0,28203 kWh/m <sup>3</sup>
Consumo de martetele	$\alpha_{mart}$	62,49730 kWh/m <sup>3</sup>
Consumo de britador	$x$	$c_{(KWh)} = -0,0327 \cdot d_{(mm)} + 4,5899$
Consumo de combustível para transporte de concreto	$\beta_{con}$	0,03846 L/m <sup>3</sup>
Consumo de combustível para transporte de resíduo	$\beta_{res}$	0,05000 L/m <sup>3</sup>
Pegada de carbono da queima de combustíveis fósseis	$E_{\beta}$	4,52060 kgCO <sub>2</sub> eq/L
Distância de transporte	$S_T$	Variável
Diâmetro médio do agregado reciclado beneficiado	$d_{méd}$	Variável

Fonte: Autoria própria.

$$E_{CO_2equiv} (kgCO_2eq/m^3) = E_{CO_2concr} + 0,39990 \cdot S_T - 0,00378 \cdot d_{méd} + 8,20531 \quad (9)$$

Tabela 5 – Parâmetros de emissão de GEE's em função da resistência do concreto demolido

Resistência do concreto - $f_{ck}$ (MPa)	Emissão GEE's - $E_{CO_2concr}$ (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )
$f_{ck} < 15$	5380,31700
$15 \leq f_{ck} < 20$	6457,36574
$20 \leq f_{ck} < 25$	7073,60233
$25 \leq f_{ck} < 30$	7645,03108
$30 \leq f_{ck}$	9246,73484

Fonte: Autoria própria.

### 5.2.1. Aplicação e interpretação do método numérico

Para exemplificação da aplicabilidade da metodologia, utilizaram-se os estudos de Paz (2020), denominado Ref 1, e Schafhauser (2019), denominado Ref 2, que sugerem uma análise do ICV da produção de agregados reciclados na cidade de Cascavel-PR e uma proposição de ACV de agregado reciclado para pavimentação na região metropolitana de Curitiba-PR, respectivamente. Assim, os valores adotados de distância total de transporte ( $S_T$ ), diâmetro do agregado reciclado ( $d_{méd}$ ) e resistência da estrutura demolida ( $f_{ck}$ ) estão relacionados na Tabela 6, bem como o valor adotado de pegada de carbono durante a produção de concreto ( $E_{CO_2concr}$ ), e o valor final de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente ( $E_{CO_2equiv}$ ). Deve-se ressaltar que em ambos os trabalhos, o inventário utilizado partiu do resíduo já produzido, portanto, não foram consideradas emissões advindas da composição do material. Dessa forma, foi necessário adotar um valor de resistência do concreto demolido, correspondendo a resistência mínima recomendada para construções em zona urbana, conforme NBR 6118 da ABNT (2014).

Tabela 6 – Valores adotados para exemplificação de aplicação do método empírico de ACV

Referência	$S_T$ (Km)	$d_{méd}$ (mm)	$f_{ck}$ (MPa)*	$E_{CO_2concr}$ (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	$E_{CO_2equiv}$ (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )
Ref 1	11,14	31,50	25	7645,03108	7657,57220
Ref 2	15,00	56,25			7659,02226

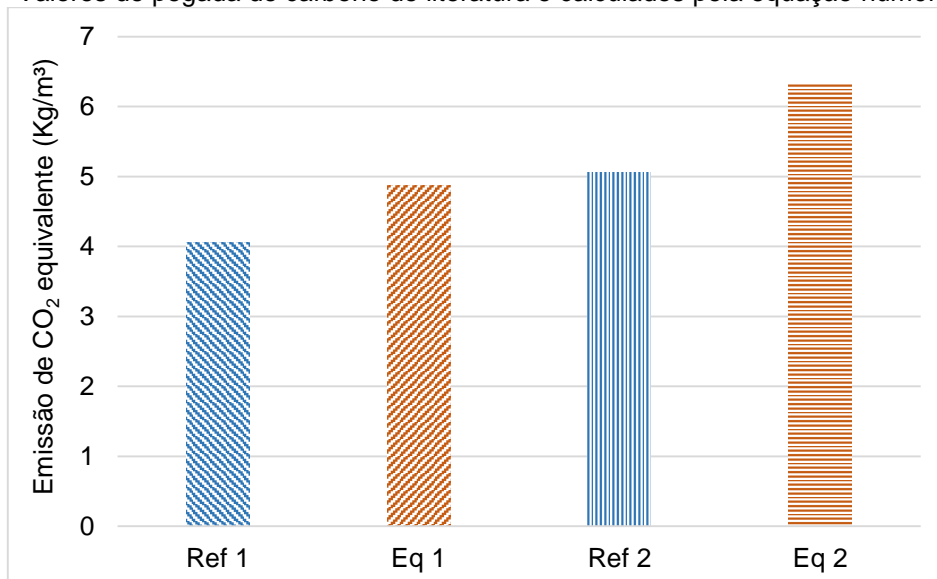
Fonte: Paz (2020), Schafhauser (2019), modificado.

Nota: \* = Devido ao fato de o dado não ter sido encontrado nas referências, foi adotado um valor arbitrário.

A aplicação dos parâmetros identificada anteriormente está relatada no Apêndice B. Assim, para os valores apresentados por Paz (2020), foram considerados somente os índices de granulometria de bica corrida reciclada, já que não foi considerada emissão por peneiramento do agregado. Assim, o dado indicado na pesquisa de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente foi de 4,0614kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, denominado Ref 1 na Figura 15. Com relação ao dado obtido por meio do método empírico, utilizou-se das informações da Tabela 6 e substituiu-se na Equação (9), obteve-se o valor total de 7657,57220kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Considerando-se somente as etapas de transporte e beneficiamento do resíduo, denominado de Eq 1, essa componente foi de 4,86710kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Com relação aos valores indicados por Schafhauser (2019) foram consideradas somente os dados da bibliografia referentes às análises de mudança climática, com as distâncias reais de transporte no município de Araucária-PR. Nesse caso, o resultado de emissão equivalente de CO<sub>2</sub> dado pela autora foi de 5,06500kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, denominado como Ref2 na Figura 15. A emissão total de CO<sub>2</sub> obtida por meio da Equação (9), substituindo-se os dados da Tabela 6, foi de 7659,02226kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Já com relação a parcela considerando novamente apenas transporte e britagem, esse valor foi de 6,31715kg/m<sup>3</sup>, identificado como Eq 2. Deve-se lembrar que esse valor de emissão faz parte do valor total, porém, para direcionar as análises para os dados que foram obtidos na bibliografia, optou-se por identificar esse valor parcelado de emissão de GEEs para as duas referências.

Figura 15 – Valores de pegada de carbono de literatura e calculados pela equação numérica



Fonte: Paz (2020), Schafhauser (2019), modificado.

Por meio da avaliação entre os valores obtidos identificado na Figura 15, levando em consideração somente os dados de transporte e de processamento do resíduo, pode-se notar que há um aumento do valor de emissão entre o valor obtido por meio da equação em comparação ao resultado da literatura, entre 19,88% e 24,72%. Isso pode ser relacionado ao fato do valor de emissão de CO<sub>2</sub> por consumo de combustível ser maior ao adotado pelas autoras. Já quando se leva em consideração a análise completa de ACV, representada pelo índice de  $E_{CO_2equiv}$  da Tabela 6, é possível observar que os valores de emissão advindos da produção do concreto e dos seus materiais constituintes, identificados como  $E_{CO_2cimen}$ ,  $E_{CO_2agreg}$  e  $E_{CO_2equip}$  na Tabela 7, compõem cerca de 99,92% das emissões. Assim, a partir disso, é possível notar que, para o método proposto, o fator preponderante no quesito de emissão de GEE's é a composição e forma de produção do concreto, fator observado por Zhang *et al.* (2019).

Tabela 7 – Pegada de carbono por etapa dos exemplos de aplicação do método

Dado	$E_{CO_2cimen}$ (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	$E_{CO_2agreg}$ (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	$E_{CO_2equip}$ (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	$E_{CO_2trans}$ (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	$E_{CO_2bemef}$ (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	$E_{CO_2equiv}$ (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )
Ref 1	7267,86597	377,16510	7,67403	4,45489	0,41221	7657,57220
Ref 2				5,99850	0,31866	7659,02226

Fonte: Paz (2020), Schafhauser (2019), modificado.

Outro ponto de destaque é que, focando na análise das emissões advindas do cimento, identificada como  $E_{CO_2cimen}$ , apesar de esse ser o componente com menor contribuição em massa, ele possui maior impacto na pegada de carbono, o seu percentual corresponde a 95,07% das emissões advindas da composição de concreto (somatória entre  $E_{CO_2cimen}$  e  $E_{CO_2agreg}$ ), ou seja, 94,90% das emissões totais do agregado reciclado, relacionado como  $E_{CO_2equiv}$  na Tabela 7 sendo a parcela com maior impacto no quesito de mudança climática, a partir da percepção da ACV. Esse comportamento também se repete em Santoro e Kripka (2016) e Visintin, Xie e Bennett (2020), que observam que quanto maior a resistência do concreto, maior a sua taxa de carbono equivalente emitido, devido ao maior consumo de cimento. No item de composição do concreto, a parcela com menor influência é o processamento da mistura, identificado como  $E_{CO_2equip}$  na Tabela 7, correspondendo a praticamente 0,00001% das emissões do concreto.

Por fim, com relação aos demais processos avaliados, entre eles o transporte e o beneficiamento do material, relacionados como  $E_{CO_2trans}$  e  $E_{CO_2bemel}$  na Tabela 7, respectivamente, pode-se observar que as emissões advindas do transporte de correspondem a até 94,96% das emissões não advindas da produção do concreto em si, comportamento esse que se repete em Visintin, Xie e Bennett (2020), e que Zhang *et al.* (2019) relatam ser uma parcela importante de ser avaliada, por ser a segunda etapa com maior emissão de GEE's, atrás da etapa de mistura do concreto. Além disso, a respeito das emissões de uso de energia elétrica, comparado com referências internacionais como Visintin, Xie e Bennet (2020), o modelo matemático apresentou valores baixos, já que o cenário nacional envolve processos mais limpos de produção de energia, como energia hidráulica e energia solar.

#### 5.2.2. Método numérico e sustentabilidade

Relacionando o método à temática da sustentabilidade abordada no trabalho, em um primeiro momento pode-se dizer que o objetivo da pesquisa foi unicamente rastrear a emissão de gases do efeito estufa durante a produção de todo o material em si. O resultado advindo da aplicação desse método pode ser utilizado em mensuração de políticas públicas de compensação de emissão de carbono, ou na avaliação de melhorias no processamento do concreto e do RCD. Porém, em uma comparação direta de viabilidade da utilização do agregado reciclado em relação ao agregado natural, focando na análise de pegada de carbono, é necessária uma nova verificação da fronteira adotada para o sistema do produto.

Isso se deve ao fato de que na prática, o concreto demolido que dá origem a certo agregado reciclado não é produzido com a única finalidade de ser transformado em resíduo, o seja, a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente que vem da produção da mistura é dissipada em outros processos de reciclagem de resíduo, e não somente na produção de agregado reciclado para pavimentação. Assim, faz mais sentido analisar somente as emissões advindas do transporte e britagem do resíduo, como é sugerido por algumas pesquisas, quando em comparação com o processo de extração e britagem da rocha sã para produção do agregado reciclado.

## 6. CONCLUSÕES

Portanto, por meio do exposto na pesquisa, foi possível desenvolver uma metodologia numérica empírica de análise de ciclo de vida direta de agregado reciclado para pavimentação com relação à pegada de carbono. Nesse método, foram selecionadas como variáveis a serem adotadas para aplicação da equação os dados de resistência do concreto demolido, granulometria desejada para o agregado e de distâncias de transporte. Além disso, existem algumas conclusões que devem ser destacadas, dentre elas:

- a) As etapas de produção, demolição e beneficiamento do agregado foram selecionadas de acordo com o escopo da ACV e com a profundidade da presente pesquisa. Há outros processos que possam fazer parte da produção do agregado reciclado, bem como outros componentes para concretos, porém, esses índices influenciariam nos valores de consumo e pegada de carbono, tornando o estudo mais complexo;
- b) Os valores de consumo de materiais e equipamentos adotados derivam de alguns dados restritos de bibliografias e planilhas públicas de composição de serviços. Caso fossem adotados outros valores de referência, ou até mesmo feita a medição em situações práticas desses dados, eles influenciariam nos valores finais de pegada de carbono;
- c) Os valores adotados para emissão de GEE's também derivam de dados restritos de bibliografias e da base de dados gratuita. Esses dados possuem uma certa sensibilidade, devido ao fato de ainda existirem poucas referências de ACV com relação a pegada de carbono. Assim, caso fossem adotados outros valores, estes influenciariam o resultado final da equação;
- d) Com relação à equação em si, os valores que mais influenciam são os materiais de composição do concreto, bem como seu consumo e as emissões dessa etapa. Dessa forma, essa é fase mais significativa do método, e que merece cuidado especial durante a análise.

Desse modo, por meio do exposto, recomenda-se a utilização desse método para avaliação de formas de compensação de emissão de GEEs na construção civil, como a quantificação de reflorestamento para captura dessas emissões atmosféricas. Outro ponto é a utilização do método para avaliação pontual de

melhoramentos do processo de produção do agregado, como diminuição do consumo de cimento e aumento da eficiência dos métodos de transporte. Deve ser lembrado que caso o método empírico seja utilizado para comparação de uso de agregado natural e agregado reciclado, a fronteira adotada para o sistema deve ser reavaliada, conforme foi citado.

Além disso, recomenda-se como análises futuras o enriquecimento dos dados de emissão e consumo adotados, e a influência dessa ação na equação final. Indica-se também a avaliação da equação com relação a outros processos de obtenção de agregado reciclado e outras composições de concreto, e a comparação dessas mudanças com o método inicial. Além disso, um importante item a ser avaliado no quesito de sustentabilidade quando se trata da reutilização de RCD é a captura de carbono ao longo da utilização de estruturas de concreto, que também pode ser incluído dentro da metodologia em pesquisas futuras.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINI INDUSTRIAL (São Miguel do Oeste). **Produtos:** Linha construção civil. Disponível em: <https://www.agostiniindustrial.com.br/produtos/linhas/linha-construcao-civil>. Acesso em: 28 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14064-1:** Gases de efeito estufa – Parte 1 – Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental - Análise de ciclo de vida - Princípios e estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 22 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14044:** Gestão ambiental - Análise de ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 52 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14049:** Gestão ambiental - Análise de ciclo de vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e análise de inventário. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 61 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15116:** Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de Cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 16 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO - ABRECON. **História do Entulho.** 2014. Disponível em: <https://abrecon.org.br/historia-do-entulho/>. Acesso em: 08 dez. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021.** São Paulo: ABRELPE, 2021. 54 p.
- BAIOCHI, A. G. **Análise de Incertezas de Parâmetro de Processos Críticos em Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações Completas.** 2019. 163 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2019.
- BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Governo Federal. **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 24 jul. 2022.
- CABRAL, K. O. **Influência da Areia Artificial Oriunda da Britagem de Rocha Granito-Gnaiss nas Propriedades do Concreto Convencional no Estado**



**Fresco e Endurecido.** 2007. 341 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Engenharia Civil, Goiânia, 2007.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL - CAIXA. **Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil - SINAPI:** Setembro/2022. Brasília: Caixa, 2022.

CALDAS, L. R. Bioeconomia Circular e Mudanças Climáticas: Avaliação da pegada de carbono de paletes de madeira reutilizados. **Mix Sustentável**, v. 7, n. 2, p. 27-40, 19 abr. 2021. <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.mix2021.v7.n2.27-40>.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE DA FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGVCS. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol:** Contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa. 2. ed. São Paulo: FGV, 2008. 39 p.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE DA FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGVCS. **Nota Técnica:** Valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa – versão 1.0. São Paulo: FGV, 2016. 5 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº307.** DOU, 5 de julho de 2002, nº136, seção 1, p 95-96.

CSM (Jaraguá do Sul). **Produtos:** Equipamentos e acessórios. Disponível em: <https://www.csm.ind.br/maquinas/produtos/>. Acesso em: 28 out. 2022.

DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E ENGENHARIA DO ESTADO DO CEARÁ – DAE. **Procedimento Operacional de Serviço:** Carga de entulho em caminhão basculante. Fortaleza: DAE, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO:** Julho/2022. Brasília: DNIT, 2022.

GREENDELTA©. **openLCA.exe.** Berlim: GreenDelta, 2006. 193 Mb. Plataforma Windows.

HUAMANI, G. B.; CHANCA, F. P. **Influencia de Agregados de Diferentes Procedencias y Diseño de Mezcla Sobre la Resistencia del Concreto.** 2018. 136 f. Tesis (Título Profesional) - Universidad Nacional de Huancavelica, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Huancavelica, 2018.

JUNQUEIRA, H. S. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos de Feira de Santana-BA:** Demanda energética e pegada de carbono. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana, 2020.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T.C. Potential of CO<sub>2</sub> Sequestration through Construction and Demolition (C&D) Waste: An overview. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v.20, p. 234-242, jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>.

KOMPLET (Itália). **Crusher.** Disponível em: <https://www.komplet-rubble-recycling.com/categoria-prodotto/crushers/>. Acesso em: 28 out. 2022.

LUNARDI, C. V. **Estudo da Viabilidade Técnica do Uso de Resíduos de Construção e Demolição em Camadas Inferiores de Pavimentos Rodoviários**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade LaSalle, Programa de Pós-Graduação em Avaliação de Impactos Ambientais, Canoas, 2020.

LUO, S. *et al.* Carbonated Recycled Coarse Aggregate and Uniaxial Compressive Stress-Strain Relation of Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 956-965, nov. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.159>.

MACIEL, L. D.; COELHO, A. R.; PEREIRA, H. R. S. Estudo das Propriedades do Concreto Convencional com Aditivo ou Adição de Água Para Correção de Consistência. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1211>.

MAZURANA, L. **Captura de CO<sub>2</sub> em Argamassa de Revestimento Através da Carbonatação Natural**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Medianeira, 2019.

MELO, E. V. de *et al.* Resíduos de construção e demolição: uma revisão dos usos e aplicabilidades em estradas e rodovias (2015 - 2020). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18658>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: 2013 – Ano-base 2012 – Relatório final**. Brasília: ANTT, 2014. 115 p.

MESQUITA, L. C. *et al.* Análise da Viabilidade Técnica de Utilização de Resíduos de Construção e Demolição na Fabricação de Blocos de Vedação. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 3, p. 30-40, nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v10i3.32651>.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Organização das Nações Unidas - ONU. **Sobre o Nosso Trabalho para Alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 24 jul. 2022.

PAZ, C. F. **Inventário do Ciclo de Vida Aplicado à Produção de Agregados a Partir de Resíduos de Construção e Demolição**. 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Medianeira, 2020.

PEREIRA, E. **Notas de Aula: Técnicas de produção e caracterização de concreto de cimento Portland**. Ponta Grossa: UEPG, 2022.

PULGROSSI, L. M. **Influência das Regras de Corte nos Resultados de Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações Completas**. 2020. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2020.

RAMOS, V. M. K. **Avaliação do Ciclo de Vida dos Materiais de uma Habitação de Interesse Social em Alvenaria Convencional**. *Light Steel Framing e Light Wood*

**Framing.** 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Curitiba, 2019.

REIS, G. S. dos *et al.* Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A review. **Materials**, v. 14, n. 7, p. 1700, mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14071700>.

RUBBLECRUSHER (Reino Unido). **Product.** Disponível em: <https://www.rubblecrusher.co.uk/>. Acesso em: 28 out. 2022.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das Emissões de Dióxido de Carbono das Matérias Primas do Concreto Produzido na Região Norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000200078>

SANTOS, T. *et al.* Life Cycle Assessment of Mortars: A review on technical potential and drawbacks. **Construction and Building Materials**, v. 288, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123069>.

SCHAFHAUSER, A. D. **Análise do Ciclo de Vida de Resíduos de Construção e Demolição Usados como Base de Pavimentos Urbanos.** 2019. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Curitiba, 2019.

SILVA, D. A. e; MELO, C. E. L. de. Utilização de Material Cerâmico Proveniente do RCD para Aplicação em Concreto: Uma revisão. **Risco - Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, São Paulo, v. 19, p. 1-15, jun. 2021.

SIQUEIRA, R. A. *et al.* Análise Comparativa entre o Concreto Usinado e o Concreto Produzido no Canteiro de Obra. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, Teófilo Otoni, v. 2, p. 145-156, dez. 2018

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA – SEEG. Observatório do Clima. **Análise das Emissões Brasileiras de Gases do Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil: 1970-2020.** SEEG, 2021. 55 p.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M. de; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. In: SATTler, M. A.; PEREIRA, F. O R. (ed.). **Coletânea Habitare: Construção e meio ambiente.** Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 96-127.

VISINTIN, P.; XIE, T.; BENNETT, B. A Large-scale Life-Cycle Assessment of Recycled Aggregate Concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119243>.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - WBCSD. **A Corporate Accounting and Reporting Standard.** Geneva: WBCSD, 2004. 116 p.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - WBCSD. **Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.** Geneva: WBCSD, 2011. 148 p.

YILMAZ, Y.; SEYIS, S. Mapping the Scientific Research of the Life Cycle Assessment in the Construction Industry: A scientometric analysis. **Building and Environment**, v. 204, out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108086>.

ZHANG, Y. *et al.* A Review of Life Cycle Assessment of Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 115-125, jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078>.

## APÊNDICE A

A seguir, encontra-se o processo de obtenção da equação numérica, por meio das equações obtidas na etapa de modelagem da equação. Os parâmetros adotados estão identificados com as respectivas variáveis. Deve-se lembrar que foi adotado um percentual de empolamento do resíduo, de modo que fosse necessário 1,3m<sup>3</sup> de concreto para gerar 1m<sup>3</sup> de resíduo. Assim, foi adotado um coeficiente de 0,7692 de conversão da composição do concreto relatada anteriormente para composição do resíduo, conforme identificado na Tabela A - 1.

$$E_{CO_2concr} = cim \cdot E_{cim} + bri \cdot E_{bri} + are \cdot E_{are}$$

$$E_{cim} = 23,45113 \frac{KgCO_2eq}{Kg}, E_{bri} = 0,26378 \frac{KgCO_2eq}{Kg}, E_{are} = 0,25410 \frac{KgCO_2eq}{Kg}$$

Tabela A - 1 – Índices de consumo e de pegada de carbono dos componentes de concreto

Classe	<i>cim</i> (Kg/m <sup>3</sup> )	<i>bri</i> (Kg/m <sup>3</sup> )	<i>are</i> (Kg/m <sup>3</sup> )	<i>E</i> <sub>CO<sub>2</sub>cim</sub> (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	<i>E</i> <sub>CO<sub>2</sub>bri</sub> (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	<i>E</i> <sub>CO<sub>2</sub>are</sub> (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	<i>E</i> <sub>CO<sub>2</sub>concr</sub> (KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )
-	213,50	811,30	627,69	5006,81262	214,00471	159,49603	5380,31700
C15	259,29	796,03	656,01	6080,69762	209,97610	166,69202	6457,36574
C20	285,77	771,58	662,98	6701,61138	203,52656	168,46439	7073,60233
C25	309,92	808,88	644,62	7267,86597	213,36614	163,79896	7645,03108
≥C30	379,21	822,88	538,47	8892,84889	217,05947	136,82648	9246,73484

Fonte: Autoria própria.

$$E_{CO_2produ} = E_{CO_2concr} + E_{CO_2eletr} \cdot (\alpha_{usin} + \alpha_{bomb} + \alpha_{vibr} + \alpha_{mart})$$

$$E_{CO_2eletr} = 0,11575 \frac{KgCO_2eq}{KWh}, \alpha_{usin} = 1,84450 \frac{KWh}{m^3}, \alpha_{bomb} = 2,81476 \frac{KWh}{m^3}$$

$$\alpha_{vibr} = 0,28203 \frac{KWh}{m^3}, \alpha_{mart} = 62,49730 \frac{KWh}{m^3}$$

$$E_{CO_2produ} = E_{CO_2concr} + 0,11575 \cdot (1,84450 + 2,81476 + 0,28203 + 62,49730)$$

$$E_{CO_2produ} = E_{CO_2concr} + 7,67403$$

$$E_{CO_2trans} = (\beta_{con} + \beta_{res}) \cdot E_{\beta}$$

$$\beta_{con} = 0,03846 \frac{L}{m^3}, \beta_{res} = 0,05000 \frac{L}{m^3}, E_{\beta} = 4,52060 \frac{KgCO_2eq}{L}$$

$$E_{CO_2trans} = (0,03846 + 0,05000) \cdot 4,52060$$

$$E_{CO_2trans} = 0,39990$$

$$E_{CO_2benef} = x \cdot E_x$$

$$x = -0,0327 \cdot d_{(mm)} + 4,5899, E_x = 0,11575 \frac{\text{KgCO}_2\text{eq}}{\text{KWh}}$$

$$E_{CO_2benef} = (-0,0327 \cdot d_{(mm)} + 4,5899) \cdot 0,11575$$

$$E_{CO_2benef} = -0,00378 \cdot d_{(mm)} + 0,53128$$

$$E_{CO_2equiv} = E_{CO_2produ} + E_{CO_2trans} \cdot S_T + E_{CO_2benef}$$

$$E_{CO_2produ} = E_{CO_2concr} + 7,67403, E_{CO_2trans} = 0,39990,$$

$$E_{CO_2benef} = -0,00378 \cdot d_{méd} + 0,53128$$

$$E_{CO_2equiv} = E_{CO_2concr} + 7,67403 + 0,39990 \cdot S_T - 0,00378 \cdot d_{méd} + 0,53128$$

$$E_{CO_2equiv} = E_{CO_2concr} + 0,39990 \cdot S_T - 0,00378 \cdot d_{méd} + 8,20531$$

## APÊNDICE B

A seguir, é relatada a aplicação da metodologia com os exemplos de Paz (2020), denominada Ref 1, e Schafhauser (2019), denominada Ref 2. Todos os dados adotados estão identificados pelos respectivos parâmetros.

### Ref 1

$$E_{CO_2equiv} = E_{CO_2concr} + 0,39990 \cdot S_T - 0,00378 \cdot d_{méd} + 8,20531$$

$$S_T = 11,14Km, d_{méd} = 31,50mm, f_{ck} = 25MPa \rightarrow E_{CO_2concr} = 7645,03108$$

$$E_{CO_2equiv} = 7645,03108 + 0,39990 \cdot 11,14 - 0,00378 \cdot 31,50 + 8,20531$$

$$E_{CO_2equiv} = 7657,57220 \frac{KgCO_2eq}{m^3}$$

### Ref 2

$$E_{CO_2equiv} = E_{CO_2concr} + 0,39990 \cdot S_T - 0,00378 \cdot d_{méd} + 8,20531$$

$$S_T = 15,00Km, d_{méd} = 56,25mm, f_{ck} = 25MPa \rightarrow E_{CO_2concr} = 7645,03108$$

$$E_{CO_2equiv} = 7645,03108 + 0,39990 \cdot 15,00 - 0,00378 \cdot 56,25 + 8,20531$$

$$E_{CO_2equiv} = 7659,02226 \frac{KgCO_2eq}{m^3}$$