



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

DÉBORA PATRÍCIA BATISTA DA ROCHA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS
PRODUZIDOS COM RESÍDUO INDUSTRIAL E ARGILA VERMELHA LOCAL
(NORDESTE/BRASIL)**

NATAL/RN

2020

DÉBORA PATRÍCIA BATISTA DA ROCHA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS
PRODUZIDOS COM RESÍDUO INDUSTRIAL E ARGILA VERMELHA LOCAL
(NORDESTE/BRASIL)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Luciana de Figueiredo Lopes Lucena.

NATAL/RN

2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Sistema de Bibliotecas – SISBI
Catalogação de Publicação da Fonte. UFRN – Biblioteca Central Zila Mamede

Rocha, Débora Patrícia Batista da.

Avaliação do ciclo de vida de agregados leves artificiais produzidos com resíduo industrial e argila vermelha local (Nordeste/Brasil) / Débora Patrícia Batista da Rocha. - 2020. 150f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2020.

Orientador: Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Coorientadora: Dr^a. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena.

1. Impactos ambientais - Dissertação. 2. Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) - Dissertação. 3. Sustentabilidade - Dissertação. 4. Argila expandida - Dissertação. 5. Avaliação do ciclo de vida - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Lucena, Luciana de Figueiredo Lopes. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

DÉBORA PATRÍCIA BATISTA DA ROCHA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS
PRODUZIDOS COM RESÍDUO INDUSTRIAL E ARGILA VERMELHA LOCAL
(NORDESTE/BRASIL)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador (IFPB)

Prof.^a Dr.^a Luciana de Figueiredo Lopes Lucena – Coorientadora (UFRN)

Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Examinador Interno (UFRN)

Prof.^a Dr.^a Claudia Coutinho Nóbrega – Examinador Externo (UFPB)

Natal, 09 de outubro de 2020.

Dedico ao meu Deus, Jesus Cristo, meu
Senhor e amigo, porque Dele, por Ele e para
Ele são todas as coisas;

Aos meus amados pais, meus eternos
professores;

Ao meu esposo Lucas e à minha filha Lia,
meus amores.

AGRADECIMENTOS

Sou grata primeiramente a Deus, meu maravilhoso conselheiro, fonte de toda a sabedoria, por ser minha fortaleza, meu guia e auxílio bem presentes em todos os momentos. Agradeço por me cercar com sua bondade e misericórdia todos os dias. Sem sua graça e amor, nada existiria.

Aos meus pais, meus exemplos de dedicação e coragem, seus encorajamentos e aconselhamentos me impulsionam a conquistar cada sonho. Obrigada por cada investimento e sacrifício que fizeram por mim ao longo dos anos. Ao meu irmão Felipe, pela amizade sincera e humor peculiar. Todo carinho e apoio de vocês foi fundamental e indispensável. Amo vocês.

Ao meu amado esposo Lucas, por caminhar ao meu lado, pela compreensão nos momentos difíceis e pelo incentivo na continuidade deste trabalho. Seu amor e paciência foram como alicerces para superar cada dificuldade. Obrigada pelo suporte emocional e por cada palavra de ânimo.

A Lia, minha preciosa filha, que nasceu durante o meu curso no mestrado e veio como presente dos céus para alegrar a caminhada. Seu sorriso generoso e aconchego revigorante são fontes de energia. Admito que gastei muito do seu grande estoque de paciência e amor.

Ao meu orientador Marcos Alyssandro, pela confiança em me aceitar como orientanda, pelas contribuições, apoio e estímulo para a conclusão deste trabalho.

A minha coorientadora Luciana, pela cordialidade, atenção e carinho. Obrigada pelas revisões criteriosas e pela disponibilidade em contribuir em cada etapa.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia civil (PEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) por dividirem comigo seus conhecimentos. A Viviane, pela ajuda sempre presente.

As professoras Vitória e Claudia pela leitura, correções e contribuições enriquecedoras da dissertação.

Aos meus amigos do PEC, em especial, Ana Lígia, Deize, Jemima, Nathaly e Rayanderson pelas palavras de apoio e companheirismo. Aos demais amigos, pelo valioso incentivo, em especial, minhas amigas Fladja e Yasmin, pelas orações, por estarem me apoiando nos momentos difíceis, pelos desabafos e incontáveis risadas.

A todas as empresas que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho. Obrigada pelas experiências transmitidas e os importantes apontamentos, fundamentais para o enriquecimento do trabalho.

Agradeço a Deus por colocar todas essas pessoas em meu caminho.

Ao Rei eterno, o Deus único, imortal e invisível, sejam honra e glória para todo o sempre. Amém.

1 Timóteo 1.17

RESUMO

A adoção de materiais alternativos tem se tornado uma prática cada vez mais constante na construção civil na busca por soluções sustentáveis de conservação dos recursos naturais. O reaproveitamento de resíduos industriais em novos materiais de construção tem despertado crescente interesse na avaliação dos impactos ambientais da produção de agregados reciclados em substituição aos agregados convencionais. Com esse intuito, esse estudo buscou mensurar os impactos ambientais decorrentes da produção de agregados leves artificiais produzidos com resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e argila vermelha do Nordeste brasileiro através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para isso, foi elaborada uma proposta de produção industrial com especificação das etapas e equipamentos, com possibilidade de ser adaptada a diversas regiões do Brasil. O procedimento da ACV seguiu quatro etapas principais, prescritas pelas normas ABNT ISO 14040:2009 e ABNT ISO 14044:2009: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação. A fronteira do sistema foi do berço ao portão e inclui as etapas de extração, coleta e beneficiamento das matérias-primas e produção dos agregados leves. Os impactos ambientais foram avaliados para três composições do agregado leve artificial (argila pura, substituição de 50% e 90% de RBC). As composições foram estudadas em três localizações da fábrica: Itajá/RN, Goianinha/RN e Parnamirim/RN. Os dados do inventário foram processados utilizando o software OpenLCA 1.10 com uso do método CML 2001 *non baseline* e abordagem *midpoint*. As categorias de impacto estudadas foram: acidificação, eutrofização, aquecimento global, toxicidade humana, depleção da camada de ozônio, formação de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha. Os resultados mostraram que o uso do RBC na composição dos agregados leves possibilitou a redução de até 87,21% do uso da argila vermelha como recurso natural, em dois dos três cenários analisados. As composições de agregado com uso de RBC apresentaram impactos ambientais menores (exceto na categoria de aquecimento global) em relação à composição de argila pura nos cenários em que a localização da fábrica está próxima ao local de obtenção do resíduo. As etapas de transporte influenciaram significativamente em todas as categorias de impacto devido ao uso de combustível fóssil (diesel) e os resultados são muito sensíveis as distâncias de transporte. A etapa da queima dos agregados leves possui destaque na categoria de aquecimento global. Este estudo mostrou claramente que os agregados leves com uso de resíduo industrial são capazes de contribuir para redução dos impactos ambientais durante sua produção. Os resultados podem apoiar processos

de tomada de decisão e o desenvolvimento de estudos de ACV semelhantes em agregados leves artificiais.

Palavras-chave: Impactos ambientais. Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC). Sustentabilidade. Argila expandida. Avaliação do ciclo de vida.

ABSTRACT

The adoption of alternative materials has become an increasingly constant practice in civil construction in the search for sustainable solutions for the conservation of natural resources. The reuse of industrial waste in new construction materials has aroused growing interest in environmental impacts of the production of recycled aggregates to replace conventional aggregates. To this end, this study sought to measure the environmental impacts resulting from the production of artificial lightweight aggregates produced with sugarcane biomass ash (SCBA) and red clay from the Northeast of Brazil through the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. For this, an industrial production proposal was prepared with specification of the stages and equipment, with the possibility of being adapted to different regions of Brazil. The LCA procedure followed four main steps, prescribed by the ABNT ISO 14040:2009 and ABNT ISO 14044:2009 standards: definition of objective and scope, inventory analysis, impact assessment and interpretation. The system boundary went from the cradle to the gate level and includes the stages of extraction, collection and processing of raw materials and production of lightweight aggregates. The environmental impacts were evaluated for three compositions of the artificial lightweight aggregate (pure clay, 50% replacement and 90% SCBA). The compositions were studied in three locations of the factory: Itajá/RN, Goianinha/RN and Parnamirim/RN. The inventory data were processed using OpenLCA 1.10 software using the CML 2001 non baseline method and midpoint approach. The impact categories studied were: acidification, eutrophication, global warming, human toxicity, ozone depletion, photochemical oxidants, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity and marine ecotoxicity. The results showed that the use of SCBA in the composition of lightweight aggregates allowed a reduction of up to 87.21% in the use of red clay as a natural resource, in two of the three scenarios analyzed. The aggregate compositions using SCBA showed lesser environmental impacts (except in the category of global warming) compared to the composition of pure clay in scenarios where the location of the factory is close to where the waste is obtained. The transport stages influenced significantly in all impact categories due to the use of fossil fuel (diesel) and the results are very sensitive to transport distances. The stage of burning light aggregates is highlighted in the global warming category. This study clearly showed that lightweight aggregates with the use of industrial waste can contribute to the reduction of environmental impacts during their production. The results can support decision-making processes and the development of similar LCA studies in lightweight artificial aggregates.

Keywords: Environmental impacts. Sugarcane biomass ash (SCBA). Sustainability. Expanded clay. Life cycle assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Ciclo de vida de um produto.....	28
Figura 2 –	Fases da ACV.....	31
Figura 3 –	Procedimentos simplificados para análise do inventário.....	34
Figura 4 –	Elementos mandatórios da AICV.....	37
Figura 5 –	Nível de abordagem <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>	40
Figura 6 –	Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV.....	43
Figura 7 –	Distribuição dos artigos nas bases de dados.....	49
Figura 8 –	Fases da pesquisa.....	56
Figura 9 –	Cenários de localização da fábrica de agregados leves.....	58
Figura 10 –	Mapa dos cenários de localização no Rio Grande do Norte.....	59
Figura 11 –	Simulação para locais de manejo sustentável da lenha.....	60
Figura 12 –	Fronteira do sistema.....	65
Figura 13 –	Diagrama de Fluxo de Vida (DFV).....	70
Figura 14 –	Planta da fábrica de agregados leves (sem escala)	74
Figura 15 –	Fluxograma das etapas produtivas.....	75
Figura 16 –	Caixão alimentador.....	76
Figura 17 –	Misturador.....	77
Figura 18 –	Laminador.....	78
Figura 19 –	Extrusora.....	79
Figura 20 –	Saída de agregados leves do interior do forno rotativo.....	80
Figura 21 –	Sustentabilidade e legalidade em diferentes fontes de biomassa.....	81
Figura 22 –	Lavador de gás.....	82
Figura 23 –	Fluxograma das entradas e saídas do ICV.....	85
Figura 24 –	DFV do processo elementar de extração da argila.....	86
Figura 25 –	DFV do processo elementar de transporte da argila.....	87
Figura 26 –	DFV do processo elementar de beneficiamento da argila.....	89
Figura 27 –	DFV do processo elementar de transporte do RBC.....	90
Figura 28 –	DFV do processo elementar de beneficiamento do RBC.....	91
Figura 29 –	DFV do processo elementar de alimentação.....	92
Figura 30 –	DFV do processo elementar de mistura.....	93

Figura 31 – DFV do processo elementar de laminação.....	94
Figura 32 – DFV do processo elementar de extrusão e peletização.....	94
Figura 33 – DFV do processo elementar de queima.....	96
Figura 34 – DFV do processo elementar de armazenamento e ensacamento.....	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Quantidade de teses e dissertações de estudos de ACV voltados para a construção civil por ano de defesa.....	47
Gráfico 2 –	Distribuições de teses e dissertações de estudos de ACV voltados para a construção civil nas universidades.....	47
Gráfico 3 –	Porcentagem do consumo de energia elétrica por processo para a produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições.....	99
Gráfico 4 –	Consumo de óleo diesel (L) por processo para a produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições.....	100
Gráfico 5 –	Emissões de CO ₂ por processo para a produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições.....	101
Gráfico 6 –	Consumo de recursos naturais na produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições.....	102
Gráfico 7 –	Potencial de acidificação da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	103
Gráfico 8 –	Potencial de acidificação por etapa produtiva.....	105
Gráfico 9 –	Potencial de eutrofização da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	106
Gráfico 10 –	Potencial de eutrofização por etapa produtiva.....	107
Gráfico 11 –	Potencial de aquecimento global da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	109
Gráfico 12 –	Potencial de aquecimento global por etapa produtiva.....	110
Gráfico 13 –	Potencial de toxicidade humana da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	111
Gráfico 14 –	Potencial de toxicidade humana por etapa produtiva.....	112
Gráfico 15 –	Potencial de depleção da camada de ozônio da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	113
Gráfico 16 –	Potencial de depleção da camada de ozônio por etapa produtiva.....	114
Gráfico 17 –	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	115
Gráfico 18 –	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos por etapa produtiva....	116

Gráfico 19 – Potencial de ecotoxicidade terrestre da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	117
Gráfico 20 – Potencial de ecotoxicidade marinha da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	117
Gráfico 21 – Potencial de ecotoxicidade em água doce da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica.....	118
Gráfico 22 – Potencial de ecotoxicidade terrestre por etapa produtiva.....	119
Gráfico 23 – Potencial de ecotoxicidade marinha por etapa produtiva.....	119
Gráfico 24 – Potencial de ecotoxicidade em água doce por etapa produtiva.....	120
Gráfico 25 – Potencial de acidificação, eutrofização, toxicidade humana e formação de oxidantes fotoquímicos para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba.....	123
Gráfico 26 – Potencial de ecotoxicidade terrestre, marinha e de água doce para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba.....	124
Gráfico 27 – Potencial de aquecimento global para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba.....	124
Gráfico 28 – Potencial de depleção da camada de ozônio para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Principais categorias de impacto	39
Quadro 2 –	Principais métodos de AICV e suas características.....	41
Quadro 3 –	<i>Softwares</i> de avaliação do ciclo de vida.....	45
Quadro 4 –	Síntese da revisão sistemática.....	50
Quadro 5 –	Recomendações ao processo produtivo de agregado leves.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Composição das misturas analisadas.....	57
Tabela 2 –	Especificação e quantidade dos equipamentos.....	83
Tabela 3 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de extração da argila.....	86
Tabela 4 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de transporte da argila.....	88
Tabela 5 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de beneficiamento da argila.....	89
Tabela 6 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de transporte do RBC.....	90
Tabela 7 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de beneficiamento do RBC.....	91
Tabela 8 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de alimentação.....	92
Tabela 9 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de mistura.....	93
Tabela 10 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de laminação.....	94
Tabela 11 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de extrusão e peletização.....	95
Tabela 12 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de queima dos agregados.....	96
Tabela 13 –	Quantificação das entradas e saídas do processo de armazenamento e ensacamento.....	97
Tabela 14 –	Agregação dos dados do ICV.....	98
Tabela 15 –	Impactos ambientais da produção de 1 tonelada de agregados leves.....	121
Tabela 16 –	Impactos ambientais do transporte de 1 tonelada da lenha da algaroba em diferentes distâncias.....	125
Tabela 17 –	Comparação dos resultados com estudos anteriores de ACV.....	128
Tabela 18 –	Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV nos processos elementares da produção do agregado RBC-50% no cenário II.....	130
Tabela 19 –	Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV nos processos elementares da produção do agregado RBC-90% no cenário II.....	130
Tabela 20 –	Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV nos processos elementares da produção do agregado ARG-V 100% no cenário II.....	131
Tabela 21 –	Verificação de completeza.....	132
Tabela 22 –	Verificação de sensibilidade.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida
APNE	Associação Plantas do Nordeste
APP	Área de Preservação Permanente
ARG-V	Argila vermelha
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BEN	Balanço Energético Nacional
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CBGCV	Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida
CEP	Comitê em Ética da Pesquisa
CFC	Clorofluorcarbono
CFC-11	Triclorofluormetano
CH ₃ Br	Brometo de metila
C ₂ H ₆	Etano
CNS	Conselho Nacional de Saúde
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
DFV	Diagrama de Fluxo de Vida
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GANA	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
HAPs	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
HUOL	Hospital Universitário Onofre Lopes
HCFC	Hidroclorofluorcarbono
HCL	Ácido clorídrico
HF	Ácido Fluorídrico
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciências e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida

ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>Internacional Organization for Standardization</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material particulado
MRI	<i>Midwest Research Institute</i>
NBR	Norma Técnica
NH ₄	Amoníaco
NMHC	Hidrocarboneto não-metano
NO _x	Óxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PO ₄	Fosfato
RBC	Resíduo do bagaço da cana-de-açúcar
RCD	Resíduos de construção e demolição
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
RN	Rio Grande do Norte
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental
SICV	Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida
SO _x	Óxidos de enxofre
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	Justificativa.....	24
1.2	Objetivos.....	25
1.2.1	Objetivo geral.....	25
1.2.2	Objetivos específicos.....	25
1.3	Organização da dissertação.....	26
2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	27
2.1	Origens da ACV.....	29
2.2	Metodologia da ACV.....	30
2.2.1	Definição do objetivo e escopo da ACV.....	31
2.2.1.1	<i>Objetivo da ACV.....</i>	32
2.2.1.2	<i>Escopo da ACV.....</i>	32
2.2.2	Análise de inventário do ciclo de vida (ICV).....	34
2.2.2.1	<i>Coleta de dados.....</i>	35
2.2.2.2	<i>Procedimentos de cálculo.....</i>	35
2.2.3	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	36
2.2.3.1	<i>Elementos da AICV.....</i>	36
2.2.3.2	<i>Categorias de impacto.....</i>	37
2.2.3.3	<i>Indicadores de impacto.....</i>	38
2.2.3.4	<i>Metodologia de impacto.....</i>	40
2.2.4	Interpretação do ciclo de vida.....	43
2.3	Softwares de apoio à ACV.....	44
2.4	ACV na construção civil.....	46
2.5	Revisão sistemática sobre ACV aplicada em agregados.....	48
2.5.1	Considerações sobre a revisão sistemática.....	55
3	METODOLOGIA.....	56
3.1	Informações preliminares.....	57
3.2	Cenários de localização da fábrica.....	58

3.2.1	Simulação de locais para a coleta da biomassa de combustível da etapa de queima dos agregados.....	60
3.3	Metodologia para a elaboração do modelo de fábrica para agregados leves artificiais.....	61
3.4	Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	62
3.4.1	Objetivo da ACV.....	62
3.4.2	Escopo da ACV.....	63
3.4.2.1	<i>Sistema de produto.....</i>	63
3.4.2.2	<i>Função do sistema de produto.....</i>	63
3.4.2.3	<i>Unidade funcional.....</i>	64
3.4.2.4	<i>Fronteira do sistema.....</i>	64
3.4.2.5	<i>Procedimentos de alocação.....</i>	64
3.4.2.6	<i>Metodologia de AICV e tipos de impactos.....</i>	66
3.4.2.7	<i>Requisitos de dados.....</i>	66
3.4.2.8	<i>Pressupostos.....</i>	67
3.4.2.9	<i>Limitações do estudo.....</i>	68
3.4.3	Análise do inventário do ciclo de vida.....	68
3.4.3.1	<i>Diagrama de fluxo de vida dos processos elementares.....</i>	69
3.4.3.2	<i>Dados secundários.....</i>	70
3.4.4	Avaliação de impactos ambientais de ciclo de vida (AICV).....	71
3.4.5	Interpretação do ciclo de vida.....	71
4	MODELO INDUSTRIAL DE PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS.....	73
4.1	Descrição geral da fábrica.....	73
4.2	Descrição das etapas produtivas.....	76
4.2.1	Preparação das matérias-primas.....	76
4.2.2	Alimentação e mistura das matérias-primas.....	77
4.2.3	Laminação das matérias-primas.....	78
4.2.4	Extrusão e peletização.....	78
4.2.5	Queima.....	79
4.2.6	Armazenamento e embalagem.....	82
4.3	Especificação dos equipamentos.....	83

5	ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS.....	84
5.1	Processo elementar de extração da argila.....	86
5.2	Processo elementar de transporte da argila até o local da fábrica.....	87
5.3	Processo elementar beneficiamento da argila vermelha.....	88
5.4	Processo elementar de transporte do RBC até o local da fábrica.....	89
5.5	Processo elementar de beneficiamento do RBC.....	91
5.6	Processo elementar de alimentação das matérias-primas.....	92
5.7	Processo elementar de mistura.....	93
5.8	Processo elementar de laminação.....	93
5.9	Processo elementar de extrusão e peletização.....	94
5.10	Processo elementar de queima.....	95
5.11	Processo elementar de armazenagem e ensacamento dos agregados leves....	96
5.12	Agregação dos dados.....	97
6	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS.....	103
6.1	Potencial de acidificação.....	103
6.2	Potencial de eutrofização.....	106
6.3	Potencial de aquecimento global.....	108
6.4	Potencial de toxicidade humana.....	111
6.5	Potencial de depleção da camada de ozônio.....	113
6.6	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos.....	115
6.7	Ecotoxicidade.....	116
6.8	Considerações sobre a AICV.....	122
6.9	Simulação dos impactos ambientais do transporte da biomassa para queima.....	123
6.10	Comparação com estudos anteriores.....	126
7	INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	129
7.1	Identificação das questões significativas.....	129
7.2	Avaliação do estudo.....	132
7.2.1	Verificação de completudeza.....	132

7.2.2	Verificação da sensibilidade.....	133
7.2.3	Verificação da consistência.....	133
7.3	Conclusões, limitações e recomendações.....	134
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	137
	REFERÊNCIAS.....	139
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO.....	146
	APÊNDICE B – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS LEVES EM ESCALA LABORATORIAL.....	148
	ANEXO A – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA.....	150

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor chave no combate aos desafios ambientais em todo o mundo. Os impactos ambientais da construção civil englobam toda a cadeia produtiva, desde a concepção, projetos, extração de matérias-primas, transporte de materiais, construção, uso, manutenção, demolição até destinação de resíduos gerados ao longo da vida útil. Com a ampla escala do ambiente construído, a construção e o uso dos edifícios são responsáveis por uma porção considerável do consumo dos recursos naturais. Mantidas as atuais práticas, o elevado consumo de materiais associado a atividades extrativas pode acarretar um agravamento dos problemas ambientais. Portanto, a busca pela sustentabilidade no setor tem se tornado um desafio de grandes proporções.

A influência significativa dos impactos ambientais do setor da construção civil é devido ao elevado consumo de materiais, energia, água e produção de resíduos. A produção do ambiente construído demanda entre 4 e 7 t/hab.ano de materiais e cerca de 1/3 dos recursos naturais brasileiros são destinados a produção de materiais cimentícios (AGOPYAN; JOHN, 2011). O setor de edificações é o maior consumidor de energia elétrica no mundo; no Brasil os valores chegam a 48,5% do consumo de energia elétrica (CBCS, 2014).

O material de construção mais consumido no mundo é concreto de cimento Portland, material compósito resultante da mistura homogênea de cimento, agregados e água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No setor de processos industriais, a produção do cimento foi o subsetor responsável por 24,9% das emissões de CO₂ no ano de 2016, sendo o segundo maior contribuinte, conforme dados apresentados pelas Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2019). Nesse contexto, a redução dos impactos ambientais na indústria de construção nacional deve passar preponderantemente pela cadeia de materiais.

O setor da construção utiliza mais da metade dos recursos naturais do planeta para a produção e manutenção do ambiente construído (CBCS, 2014). Conseqüentemente, a geração de resíduos é proporcional ao consumo de materiais e agravada pelas perdas nos processos. A disposição ilegal dos resíduos pode causar problemas ambientais, como assoreamento de sistemas de drenagens, além de problemas sociais, devido aos custos de remoção para os municípios (AGOPYAN; JOHN, 2011). Certamente, uma estratégia importante na redução de impactos ambientais aos fornecedores de materiais é o reuso de resíduos.

Com o aumento do desenvolvimento tecnológico, a utilização de subprodutos industriais e resíduos materiais em pó na produção de agregados artificiais leves para concretos tem atraído a atenção de pesquisadores e profissionais nos últimos anos como uma forma eficaz de

utilização dos recursos renováveis (GÜNEYISI, 2016). Barnat-Hunek *et al.* (2019) destacam diversos materiais para aplicações em agregados leves: borracha reciclada, argila expandida leve, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, clínquer de óleo de palma, pedra-pomes, partículas de plástico de polipropileno modificado. Estudos realizados por Souza *et al.* (2020), Souza *et al.* (2019), Tang e Brouwers (2019), Aslani (2019), Moreno-Maroto *et al.* (2017) e Santis e Rossignolo (2014) destacam formas de produzir agregados leves a partir de resíduos industriais e/ou argilas locais.

Nesse contexto, é fundamental que a seleção de materiais seja amparada por critérios ambientais. Ao longo do ciclo de vida, qualquer produto exerce impactos no meio ambiente. Por exemplo, um material em algum estágio da sua vida útil pode provocar a liberação de produtos tóxicos, contribuir para a destruição de biomas, consumir quantidades excessivas de energia ou mesmo liberar poluentes diversos na água e ar, além da geração de resíduos sólidos (AGOPYAN; JOHN, 2011). Portanto, o estudo da viabilidade ambiental de novos materiais alternativos através da quantificação dos impactos ambientais é fundamental para atingir metas de sustentabilidade, especialmente, com o objetivo de redução do consumo de recursos naturais e de emissões para água, ar e solo.

Nessa perspectiva, a avaliação do ciclo de vida (ACV) destaca-se como uma ferramenta de gestão ambiental capaz de estabelecer critérios ambientais mensuráveis em termos de desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de um produto. Por sua natureza abrangente, a abordagem sistemática da ACV se destaca como uma técnica coerente para a avaliação dos impactos, especialmente para novos materiais de construção civil (KURDA *et al.*, 2019; INGRAO *et al.*, 2019; PARK *et al.*, 2019; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2018).

1.1 Justificativa

A adoção de materiais alternativos tem se tornado uma prática cada vez mais constante em diversos setores na busca por soluções sustentáveis de conservação dos recursos naturais. A relevância desta pesquisa se justifica na necessidade de estabelecer critérios ambientais mensuráveis para avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de agregados leves artificiais. Atualmente, a argila expandida é o principal agregado aplicado em concretos estruturais leves, cuja produção no Brasil possui foco apenas na região Sudeste, demandando altas emissões de CO₂ vinculados à etapa de transporte de agregados para outras regiões. Dessa forma, o presente trabalho busca esclarecer os aspectos técnicos e ambientais sobre o uso de

agregados leves com uso de resíduos e matérias-primas locais, especialmente na região Nordeste brasileira.

Os resíduos industriais podem representar uma grande fonte de contaminação do solo e de águas subterrâneas se dispostos inadequadamente. Nessa perspectiva, a atual situação global enseja a concepção de novas tecnologias de uso racional dos recursos naturais, em especial, no segmento da construção civil, que detém uma importante representação mundial em termos de consumo. O trabalho propõe um estudo do uso de resíduos que anteriormente estariam dispostos em aterros e, por vezes, de maneira inadequada.

Outro aspecto importante é a contribuição através de informações científicas para a compilação de um inventário brasileiro de produtos. Os esforços iniciais surgiram com a criação do Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), banco de dados criado para abrigar Inventários do Ciclo de Vida (ICVs) de produtos nacionais. Entretanto ainda há forte dependência de banco de dados europeus, que nem sempre são representativos para realidade nacional.

Verificou-se ainda uma lacuna na revisão da literatura, pois não foram encontrados trabalhos que estudaram o desempenho ambiental com uso da metodologia ACV de agregados leves produzidos com resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e argila vermelha (ARG-V). Ressalta-se a necessidade de estudos de ACV voltados para os agregados leves da construção civil e a carência da associação de universidades, iniciativas privadas, órgãos públicos, entre outros, para a promoção da ACV no Brasil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o ciclo de vida da produção de agregados leves artificiais produzidos com resíduo de biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e argila vermelha local (ARG-V) em escala industrial para três composições de mistura das matérias-primas (ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%).

1.2.2 Objetivos específicos

- Propor um modelo industrial através da seleção de equipamentos industriais e arranjo físico para a produção dos agregados leves artificiais;
- Identificar as entradas e saídas do fluxo do processo produtivo dos agregados leves artificiais;
- Quantificar os impactos ambientais da produção dos agregados leves em três municípios do Rio Grande do Norte (Itajá, Goianinha e Parnamirim);
- Identificar os impactos ambientais em cada etapa produtiva;
- Identificar as etapas críticas e propor recomendações para o fluxo de processo;

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em sete capítulos. Neste primeiro capítulo, são apresentados a contextualização, justificativa da pesquisa, os objetivos e a estrutura da organização.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica da ACV preconizada pelas normas ABNT ISO 14.040 (ABNT, 2009a) e ABNT ISO 14.044 (ABNT, 2009b), juntamente com pesquisas que empregaram a metodologia da ACV na produção de agregados reciclados na construção civil.

O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada na pesquisa. São detalhados o objetivo e escopo da ACV, considerações sobre as fronteiras do estudo, levantamento do inventário, procedimentos de cálculo e categorias de impacto selecionadas.

O Capítulo 4 apresenta o modelo industrial proposto para a produção dos agregados leves artificiais com especificação dos equipamentos, descrição das etapas produtivas e arranjo físico da fábrica.

O Capítulo 5 detalha o inventário do ciclo de vida da produção dos agregados leves em escala industrial, onde estão quantificados todas as entradas e saídas de cada etapa produtiva.

O Capítulo 6 apresenta a avaliação dos impactos ambientais resultantes da produção dos agregados leves e as discussões do estudo da ACV para as diferentes composições do agregado.

O Capítulo 7 apresenta a fase final de interpretação da ACV, onde são esboçadas as conclusões do estudo e recomendações.

Por fim, no Capítulo 8 são apresentadas as considerações finais.

2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Os problemas de esgotamento de recursos naturais e a necessidade de produtos mais sustentáveis aumentaram a busca pelo desempenho ambiental de produtos, processos e serviços. Empresas e indústrias estão cada vez mais preocupados com os efeitos dos produtos sobre o meio ambiente e as estratégias de redução dos problemas ambientais associados. Uma ferramenta capaz de auxiliar essa investigação é a avaliação do ciclo de vida (ACV). A técnica surge da necessidade de uma abordagem sistemática e estratégica na investigação dos impactos no meio ambiente de produtos ao longo da cadeia de processos.

A ACV é uma técnica de avaliação das contribuições ambientais associados a um sistema de produto com objetivo de sugerir formas mais sustentáveis de produção e consumo. Uma análise completa do ciclo de vida pode compreender etapas que vão desde a extração das matérias-primas (berço), os sistemas de produção, o uso do produto, sua disposição final (túmulo) e, mais recentemente, sua reutilização e reciclagem. A metodologia da ACV pode fornecer informações sobre os impactos ambientais de cada estágio do ciclo de vida de um produto. Os resultados possuem natureza científica e quantitativa e podem auxiliar na tomada de decisões, desenvolvimento e processo de design de um produto (UNEP, 1996; BARROS *et al.*, 2019; PÉREZ; LUMBRERAS; RODRÍGUEZ, 2020).

O ciclo de vida de um produto (Figura 1) engloba diversos estágios consecutivos desde a aquisição da matéria-prima até sua reutilização. Durante o ciclo de vida, ocorrem um conjunto de processos que geram liberações, emissões para a atmosfera e descarga para corpos d'água e para o solo (ABNT, 2009a). A ACV permite uma perspectiva geral das consequências ambientais decorrentes de um produto ao longo do seu ciclo de vida, onde são avaliados os descartes produzidos nos diferentes processos, tais como as emissões atmosféricas e a geração de resíduos sólidos, o consumo de recursos materiais e energia e as consequências ambientais do uso e disposição final do produto. Com caráter gerencial, a metodologia vem sendo consolidada como ferramenta quantitativa de impactos ambientais.

A ACV é uma técnica normalizada internacionalmente e inserida nas normas da série *International Organization for Standardization* (ISO) 14000, mais especificadamente nas normas ISO 14.040 e ISO 14.044. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), representante da ISO, adaptou às terminologias brasileiras e tem como normas correspondentes a ABNT NBR ISO 14.040:2009 e ABNT NBR ISO 14.044:2009.

Figura 1 – Ciclo de vida de um produto



Fonte: UNEP; SETAC, 2007.

A ACV é uma técnica que possui uma diversidade de propósitos. A realização de uma ACV auxilia o processo de identificação de oportunidades de melhorias ambientais nas fases de um sistema de produção (produção, uso e disposição), no entendimento dos aspectos ambientais de forma mais ampla, no subsídio às estratégias de marketing (declarações ambientais ou esquema de rotulagem) e na comparação da performance ambiental de produtos (CHEHEBE, 2002; MINKOV *et al.*, 2020). Portanto, trata-se de uma ferramenta imprescindível para uma atuação ambiental mais responsável.

Segundo a ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a ACV pode auxiliar em diversos aspectos: identificação de oportunidades de melhoria ambiental em pontos do ciclo de vida associados a um produto, na tomada de decisões, na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental (incluindo técnicas de medição) e no *marketing*. As aplicações da análise do ciclo de vida podem ser diversas:

Internamente, as indústrias podem usar as técnicas de ACV para o desenvolvimento de novos produtos ou otimização de produtos e processos existentes, e para reduzir os impactos ambientais dos produtos em toda a sua vida, permitindo, ainda a seleção de indicadores de *performance* ambiental. Externamente, elas podem utilizar as técnicas para divulgar ao consumidor ou a órgãos ambientais melhorias dos aspectos ambientais dos seus produtos e processos, ou ainda comparar qualidades ambientais com outros competidores (SANTOS, 2011, pág. 18 e 19).

Adicionalmente, a busca por processos produtivos ambientalmente menos poluidores e mais adequados e seguros à saúde humana deve passar por uma questão estratégica e não somente por otimizações de natureza técnica (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). O enfoque gerencial da ACV é um importante recurso para auxiliar a tomada de decisões estratégicas, a administração dos aspectos ambientais, o aumento da eficiência no uso de recursos e a prevenção à poluição (CHEHEBE, 2002; NILSSON-LINDÉN *et al.*, 2018).

2.1 Origens da ACV

A ACV teve seu início na década de 1960. Em decorrência da crise do petróleo e as preocupações associadas ao esgotamento dos recursos, houve um aumento na busca por novas formas de energia e pelo consumo racional das atuais fontes energéticas. Nesse período, diversos estudos foram desenvolvidos com enfoque nas questões energéticas e nos aspectos ambientais, incluindo estimativas de emissões sólidas, gasosas ou líquidas (CHEHEBE, 2002). Uma das primeiras publicações que marcou o uso da metodologia de ACV em sistemas de produção foi o trabalho de Harold Smith, em 1963, na “*World Energy Conference*”, o autor apresentou o cálculo das necessidades de energia para a fabricação de produtos químicos (EPA, 2006).

Em 1965, a *Coca-Cola Company* financiou um estudo realizado pelo *Midwest Research Institute* (MRI) para comparar diferentes tipos de embalagens com intuito de identificar qual delas tinha o menor consumo de recursos naturais e as mais baixas emissões. No início dos anos 1970, empresas nos Estados Unidos e na Europa realizaram estudos semelhantes abordando discussões sobre materiais para embalagens. As fontes de dados disponíveis eram documentos de governo e dados de relatórios técnicos (EPA, 2006). O processo de quantificar os índices de emissões tornou-se conhecido como REPA (*Resource and Environmental Profile Analysis*), o que seria uma análise do perfil ambiental e de recursos.

Em 1974, o MRI realizou um aprimoramento dos estudos para a EPA (*Environmental Protection Agency*). O trabalho ficou conhecido como um marco no surgimento da ACV. Em 1985, a Comunidade Econômica Europeia lançou a primeira diretiva para embalagens na área de alimentos, tornando obrigatório o monitoramento do consumo de matérias-primas, energia e geração de resíduos (CHEHEBE, 2002).

Em 1990, o termo “Avaliação do Ciclo de Vida” foi proposto pelos participantes de um *workshop* da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC), a organização marcou o desenvolvimento da ACV em diversas áreas (HORNE; GRANT; VERGHESE, 2009). Em

1997, foi lançada pela ISO a norma ISO 14040, Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Em 2002, o UNEP (*United Nations Environmental Programme*) juntamente com a SETAC criou uma parceria internacional (incluindo governos, empresas, organizações científicas e da sociedade civil) para estimular o pensamento do ciclo de vida, conhecida como *Life Cycle Initiative*. A iniciativa tem por função facilitar o acesso ao conhecimento do ciclo de vida ambiental, econômico e social.

No Brasil, a ACV teve início na metade da década de 1990, quando um subcomitê específico para o tema foi implantado dentro do Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA) em 1994 (FGV, 2017). Em 2001, foi lançada a versão internacional traduzida da norma ISO, a ABNT NBR ISO 14040. A Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) foi criada em 2002, composta por pessoas físicas e jurídicas interessadas no desenvolvimento e aplicação da ACV no Brasil. Atualmente, a ABCV promove eventos como o Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida (CBGCV).

Mais recentemente, foi criado Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) através da resolução 04/2010 do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO) (BRASIL, 2010). O PBACV é composto por entidades do governo, instituições de pesquisa e associações industriais com o objetivo de fomentar a metodologia ACV no Brasil.

2.2 Metodologia da ACV

As recomendações da condução dos estudos sobre ACV e seus procedimentos metodológicos estão regulamentados em normas brasileiras, a saber:

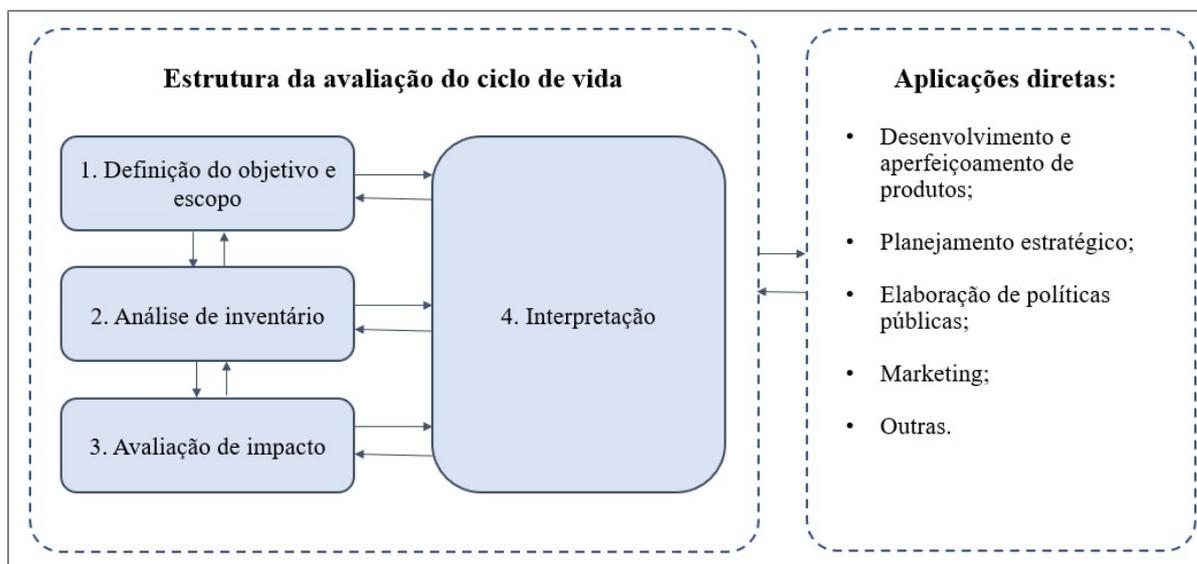
- NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental: avaliação do ciclo de vida, princípios e estrutura (ABNT, 2009a);
- NBR ISO 14044 – Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida, requisitos e orientações. (ABNT, 2009b).

O procedimento propõe a divisão dos estudos em ACV em quatro fases:

- a) Definição de objetivo e escopo;
- b) Análise de inventário do ciclo de vida (ICV);
- c) Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV); e,
- d) Interpretação.

As fases possuem natureza iterativa, portanto, podem ser ajustadas ao longo do desenvolvimento do estudo, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Fases da ACV



Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2009a).

Em síntese, na primeira fase da ACV será definido o escopo e os objetivos do estudo, nesta fase também serão delimitados os processos envolvidos, a fronteira do sistema, tipo de coleta de dados e limitações da análise. Após a fase inicial, a segunda fase a ser realizada é a etapa de análise de inventário (ICV). Esta fase abrange a coleta de dados de entrada e saída do sistema, incluindo recursos, energia, produtos e demais aspectos ambientais considerados importantes para o ciclo de vida, esses dados serão agrupados para cada item e, no final, a análise de inventário definirá a carga ambiental associada ao produto (SANTOS, 2011). Com base na análise de inventário da etapa anterior, a terceira fase da ACV é a análise de impactos consiste na classificação e caracterização das entradas e saídas do inventário. Para concluir, a metodologia da ACV seguirá para a etapa final de interpretação ou avaliação, em que serão realizadas recomendações de melhorias e tomadas de decisão na escolha do produto. As características de cada fase estão destacadas nos subitens a seguir.

2.2.1 Definição do objetivo e escopo da ACV

A definição do objetivo e escopo é uma etapa importante na identificação do nível de detalhamento dos trabalhos e a forma de divulgação dos dados para se adequar ao público alvo.

O objetivo e o escopo devem ser definidos de forma clara e consistente de acordo com a aplicação pretendida (ABNT, 2009b).

2.2.1.1 *Objetivo da ACV*

A definição do objetivo da ACV inclui a definição dos seguintes itens: aplicação pretendida, razões do estudo, bem como a quem se pretende comunicar os resultados e se há intenção de publicar os dados comparativamente entre produtos. Isso auxilia a identificar as necessidades de revisão crítica, incluindo a forma e nível técnico adequados dos relatórios (IBICT, 2010; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

2.2.1.2 *Escopo da ACV*

A NBR ISO 14040:2009 estabelece que a definição do escopo da ACV deve ser delimitada pelos seguintes itens: sistema de produto; funções do sistema; unidade funcional; fronteira do sistema; procedimentos de alocação; categorias de impacto e a metodologia de avaliação dos impactos; requisito de dados; pressupostos; limitações análise crítica do estudo e o tipo e formato do relatório para o estudo.

Os itens constituintes do escopo são detalhados a seguir (ABNT, 2009b):

- a) Sistema de produto: definição da função do produto e a sua aplicação;
- b) Unidade funcional: quantifica o desempenho do produto e serve de referência para relacionar as entradas e saídas, com a finalidade de assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV. A escolha da unidade funcional deve ser criteriosa visto que é importante para a comparação dos resultados da ACV de produtos alternativos (SANTOS, 2011).
- c) Fronteira do sistema: delimitação dos processos que serão analisados no estudo. A seleção dos limites está associada ao objetivo do estudo. As fronteiras utilizadas usualmente são:
 - *cradle to grave* (berço ao túmulo): compreende a extração dos recursos, transporte, produção até o descarte do produto;
 - *cradle to gate* (berço ao portão): abrange a extração dos recursos, transporte, fabricação e se encerra com o produto pronto para sair do portão da fábrica;
 - *gate to gate* (portão ao portão): inclui apenas a produção do produto;

- *gate to grave* (portão ao túmulo): compreende a produção até o descarte;
- *cradle to cradle* (berço ao berço): inclui a extração dos recursos até a reciclagem do produto.

Os limites do sistema também podem ser identificados de maneira geográfica, temporal e tecnológica.

- d) Procedimentos de alocação: procedimento adotado quando há problemas de multifuncionalidade, quando se consideram processos industriais nos quais muitos produtos e subprodutos são gerados a partir das mesmas matérias-primas (SANTOS, 2011).
- e) Categorias de impacto e metodologia de avaliação de impactos: representam as questões ambientais relevantes associadas ao sistema analisado. O inventário do ciclo de vida (ICV) também requer a definição da modelagem aplicada ao sistema, que pode ser do tipo atribucional ou consequencial exemplo (IBICT, 2010):
- Modelagem atribucional: representa os impactos ambientais potenciais de um produto ao longo do seu ciclo de vida, ela é designada como “descritiva” e utiliza dados mensuráveis e históricos.
 - Modelagem consequencial: identifica as consequências de uma decisão nos processos e produtos, ela é baseada em mecanismos de mercado, incluindo interações políticas e alterações do comportamento dos consumidores, por exemplo.
- f) Requisitos de dados: as fontes de dados e informações podem ser classificadas em fontes primárias e secundárias (IBICT, 2010; EUROPEAN COMMISSION, 2010). Segundo Mattar (2005):
- Dados primários: são aqueles que ainda não foram coletados e possuem o propósito de atender às necessidades específicas da pesquisa;
 - Dados secundários: são aqueles que já foram coletados e estão catalogados à disposição do pesquisador.

As fontes de dados primários podem ser questionários, entrevistas, observação e experimentação. As fontes de dados secundários podem ser bancos de dados nacionais, publicações científicas, relatórios nacionais e internacionais. As combinações entre dados primários e secundários são possíveis, se eles forem consistentes.

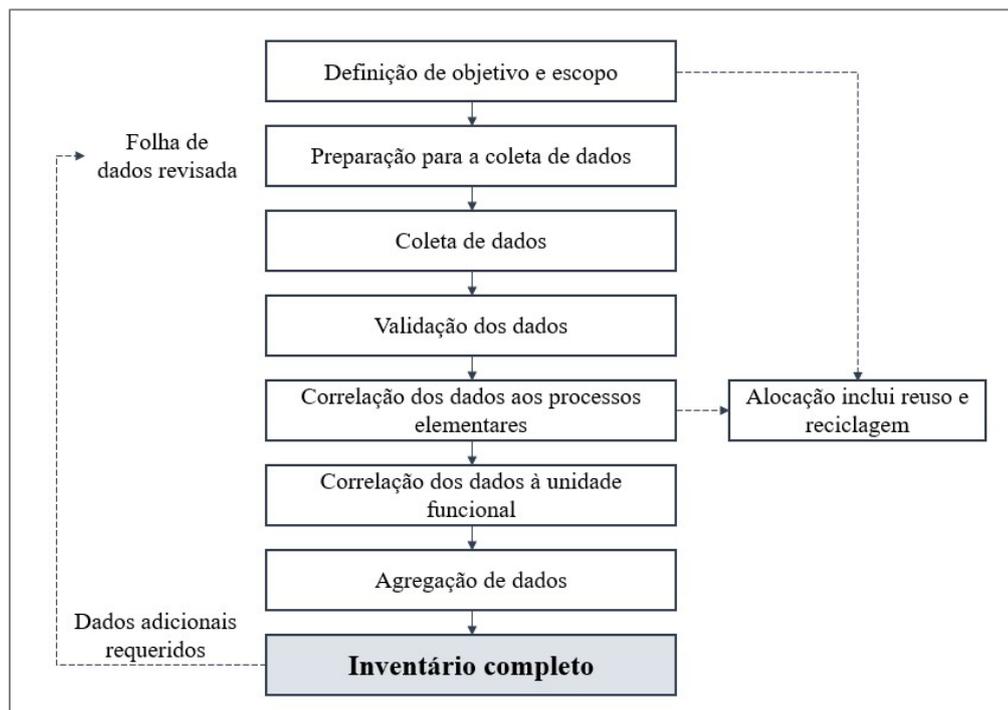
- g) Análise crítica: consiste na verificação da consistência da análise realizada e nível de satisfação de requisitos como: metodologia, dados, interpretação e comunicação.
- h) Tipo e formato de relatório: é a forma de divulgação dos resultados e conclusões da ACV ao público alvo.

O escopo deve ser bem definido para garantir que o objetivo da ACV seja atendido. Algumas situações podem exigir que o escopo seja revisado e ajustado, em caso de limitações ou restrições ao desenvolvimento do trabalho.

2.2.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

A segunda fase da ACV envolve a coleta de dados necessários ao alcance dos objetivos do estudo, ou seja, nesta fase é a de criação de um inventário de dados de entrada e saída do sistema de produto, considerando as fronteiras e a unidade funcional pré-estabelecida. O ICV é um processo de quantificação das necessidades de energia, matérias-primas, emissões atmosféricas, resíduos sólidos, dentre outras liberações ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou atividade (EPA, 2006). As recomendações da NBR ISO 14044:2009 indicam que a execução do inventário deve ser seguida por procedimentos destacados na Figura 3.

Figura 3 – Procedimentos simplificados para análise do inventário



Fonte: ABNT NBR ISO 14044 (2009b).

2.2.2.1 *Coleta de dados*

A coleta de dados deve ser realizada para cada processo elementar previsto na fronteira do sistema, a fim de quantificar as respectivas entradas e saídas. Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a, p. 5), o processo elementar é o “menor elemento considerado na análise do inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados”.

Nesta fase, devem ser registrados o processo de coleta, a época e todas as informações adicionais importantes para as conclusões do estudo. Também é fundamental a elaboração de fluxogramas para os processos elementares e a descrição dos procedimentos de cálculo considerados. Conforme a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), os dados podem ser classificados em:

- entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares e outras entradas físicas;
- produtos, coprodutos e resíduos;
- liberações para a atmosfera, água e solo;
- outros aspectos ambientais.

A correlação dos dados deve ser realizada com base nos fluxos de cada processo elementar, que juntos formarão o fluxo de referência. Para isso, todos os dados de entrada e saída devem ser referenciados à unidade funcional.

2.2.2.2 *Procedimentos de cálculo*

A NBR ISO 14044:2009 propõe as seguintes recomendações para os procedimentos de cálculo do inventário do ciclo de vida:

- a) é conveniente aplicar os mesmos procedimentos de cálculo ao longo de todo o estudo;
- b) os fluxos elementares devem ser associados à linha de produção;
- c) a agregação de dados deve ser realizada somente para substâncias equivalentes e impactos ambientais semelhantes;
- d) a fronteira do sistema poderá ser revisada para limitar o uso de dados de entrada e saída somente àqueles caracterizados como significativos para o objeto de estudo da ACV. O processo de refinamento pode resultar em exclusão de estágios do ciclo de vida ou de

- processos elementares não significativos, exclusão de entradas e saídas ou inclusão de novos processos importantes para os resultados do estudo;
- e) em caso de alocação, a soma das entradas e saídas de um processo elementar deve ser igual antes e após a alocação.

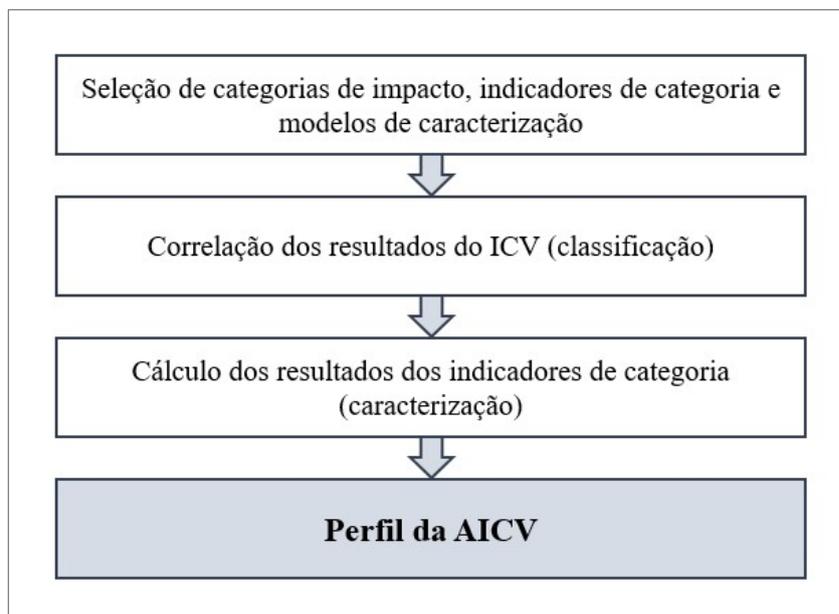
2.2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV, ou LCIA, sigla do inglês *Life Cycle Impact Assessment*) é a fase direcionada a transformar os resultados da análise do inventário (ICV) em impactos ambientais. Na elaboração do ICV é gerada uma lista de substâncias que podem dificultar a interpretação, quando comparadas com outros produtos. Além disso, substâncias diferentes produzem diversos tipos de impactos ambientais, isso pode complicar ainda mais a interpretação (UNEP, 1996). Portanto, usualmente, os dados do ICV não são suficientes para a tomada de decisões, sendo necessário a associação dos dados a categorias de impacto específicas.

2.2.3.1 Elementos da AICV

A AICV consiste em elementos obrigatórios e opcionais. Nesta fase, os elementos obrigatórios são: a seleção de categorias de impacto, indicadores de categorias e modelos de caracterização; correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação) e cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização). Os elementos opcionais tratam da normalização, agrupamento e ponderação dos indicadores (ABNT, 2009a). A Figura 4 exemplifica as fases da AICV.

Figura 4 – Elementos mandatórios da AICV



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 14040 (2009a).

Dessa forma, na classificação são especificadas as categorias de impacto escolhidas (por exemplo, aquecimento global, acidificação, toxicidade terrestre). Na caracterização, os impactos ambientais das substâncias envolvidas no estudo são quantificados a partir de fatores de conversão, geralmente esse processo é auxiliado por um programa de computador. Após a caracterização, será realizada o perfil da AICV.

2.2.3.2 Categorias de impacto

As categorias de impacto são classes que representam os problemas ambientais relevantes associados aos resultados da análise do ICV e são definidas com base nas questões ambientais relacionadas ao sistema de produto, levadas em consideração no objetivo e escopo. As principais categorias de impacto estão listadas a seguir (UNEP, 1996):

- a) Aquecimento global (GWP, sigla do inglês *Global Warming Potential*) – impacto associado ao aumento da emissão de gases de efeito estufa, conhecidos por absorver a radiação emitida pela superfície terrestre. A consequência é o aumento da temperatura média da Terra.
- b) Depleção da camada de ozônio (ODP, sigla do inglês *Ozone Depletion Potential*) – a redução da camada de ozônio leva ao aumento da quantidade de radiação ultravioleta

- (UV-B) que atinge a superfície terrestre, podendo resultar no aumento de algumas doenças, danos a materiais, como plásticos, e interferências nos ecossistemas.
- c) Acidificação (AP, sigla do inglês *Acidification Potential*) – deposição de ácidos resultantes da poluição atmosférica (liberação de óxidos de nitrogênio e enxofre) provocando alteração na acidez do solo e da água, com efeitos na fauna e flora.
 - d) Formação de oxidantes fotoquímicos (POCP, sigla do inglês *photochemical oxidant formation*) – formação de uma névoa seca (*smog*) associada a reação dos óxidos de nitrogênio com compostos orgânicos voláteis (COVs) produzindo oxidantes fotoquímicos.
 - e) Toxicidade humana (HT, sigla do inglês *Human Toxicity*) – exposição a substâncias tóxicas, através do ar, água e solo, especialmente pela cadeia alimentar, causando danos à saúde humana.
 - f) Eutrofização (NP, sigla do inglês *Nutrification Potential*) – na água, provoca a redução da concentração de oxigênio afetando organismos superiores, como peixes, também pode levar a indesejáveis mudanças no número de espécies nos ecossistemas, alterações na biodiversidade, na qualidade da água e geração de toxinas nocivas à saúde.
 - g) Ecotoxicidade aquática e terrestre (ECA, do inglês *aquatic ecotoxicity*, e ECT, *terrestrial ecotoxicity*) – redução da biodiversidade na fauna e flora por substâncias tóxicas.
 - h) Depleção abiótica (AP, sigla do inglês *abiotic depletion*) – extração de matérias-primas não renováveis, tal como minérios.
 - i) Consumo de recursos energéticos (EDP, sigla do inglês *energy depletion*) – consumo de fontes de energia renováveis e não renováveis.

Outras informações sobre as categorias de impacto, tais como escala (local, regional ou global), substâncias associadas no ICV, descrição do fator de caracterização e efeitos no meio ambiente, são encontradas no Quadro 1.

2.2.3.3 Indicadores de impacto

Os indicadores representam quantitativamente os impactos de cada categoria e podem ser obtidos com seguinte equação:

$$(\text{Dados do inventário}) \times (\text{Fator de caracterização}) = \text{Indicador de impacto}$$

Os fatores de caracterização ou fatores de equivalência são obtidos com base científica e oferecem uma estimativa do impacto de cada substância (metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, entre outras) para cada questão ambiental (aquecimento global, acidificação toxicidade terrestre). O Quadro 1 mostra as principais categorias de impacto, incluindo a descrição do fator de caracterização e os efeitos dos impactos no meio ambiente.

Quadro 1 – Principais categorias de impacto

Categoria de impacto	Escala	Exemplo de dados do ICV	Descrição do fator de caracterização	Efeitos
Aquecimento global	Global	Dióxido de carbono (CO ₂) Dióxido de nitrogênio (NO ₂) Metano (CH ₄) Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) Brometo de metila (CH ₃ Br)	Converte os dados do inventário em dióxido de carbono (CO ₂) equivalente.	Degelo polar, a perda da umidade do solo, estações mais longas, perda ou mudança de florestas e mudanças dos padrões de vento e mar.
Depleção da camada de ozônio	Global	Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) Halons Brometo de metila (CH ₃ Br)	Converte os dados do inventário em triclourofluormetano (CFC-11) equivalentes.	Aumento da radiação ultravioleta
Acidificação	Local e regional	Óxidos de enxofre (SO _x) Óxidos de nitrogênio (NO _x) Ácido clorídrico (HCL) Ácido Fluorídrico (HF) Amoníaco (NH ₄)	Converte os dados do inventário em íons hidrogênio (H ⁺) equivalentes.	Corrosão, acidificação de corpos d'água, efeitos na vegetação e efeitos no solo.
Eutrofização	Local	Fosfato (PO ₄) Óxido de nitrogênio (NO) Dióxido de nitrogênio (NO ₂) Nitratos Amônia (NH ₄)	Converte os dados do inventário em fosfato (PO ₄) equivalentes.	Aumento de nutrientes em corpos d'água (fosforo e nitrogênio), tais como lagos e estuários e fluxos lentos, causando crescimento excessivo das plantas e esgotamento de oxigênio.
Formação de oxidantes fotoquímicos	Local	Hidrocarbonetos não-metano (NMHC)	Converte os dados do inventário em etano (C ₂ H ₆) equivalentes.	Reduz a visibilidade, irritação nos olhos, no trato respiratório e pulmões e danos a vegetação.
Toxicidade terrestre	Local	Os produtos químicos tóxicos com uma concentração letal para roedores	Converte os dados do inventário em substância tóxica equivalente.	Redução da biodiversidade.
Toxicidade aquática	Local	Os produtos químicos tóxicos com uma concentração letal para peixes	Converte os dados do inventário em substância tóxica equivalente.	Redução da biodiversidade aquática e diminuição da pesca comercial e recreativa.
Saúde Humana	Local e regional	Total de emissões para o ar, água e solo.	Converte os dados do inventário em substância tóxica equivalente.	Aumento da morbidade e mortalidade.
Esgotamento de recursos	Local, regional e global	Quantidade de minerais utilizados e a quantidade de combustíveis fósseis utilizados.	Converte os dados do inventário para uma quantidade proporcional dos recursos utilizados versus a quantidade de recurso na reserva.	Redução de recursos para a geração futura.
Uso da terra	Local, regional e global	Quantidade eliminada em aterro ou outras modificações na terra.	Converte a massa de resíduos sólidos em volume usando uma densidade estimada.	Perda de habitat terrestre para a vida selvagem e diminuição do espaço do aterro.

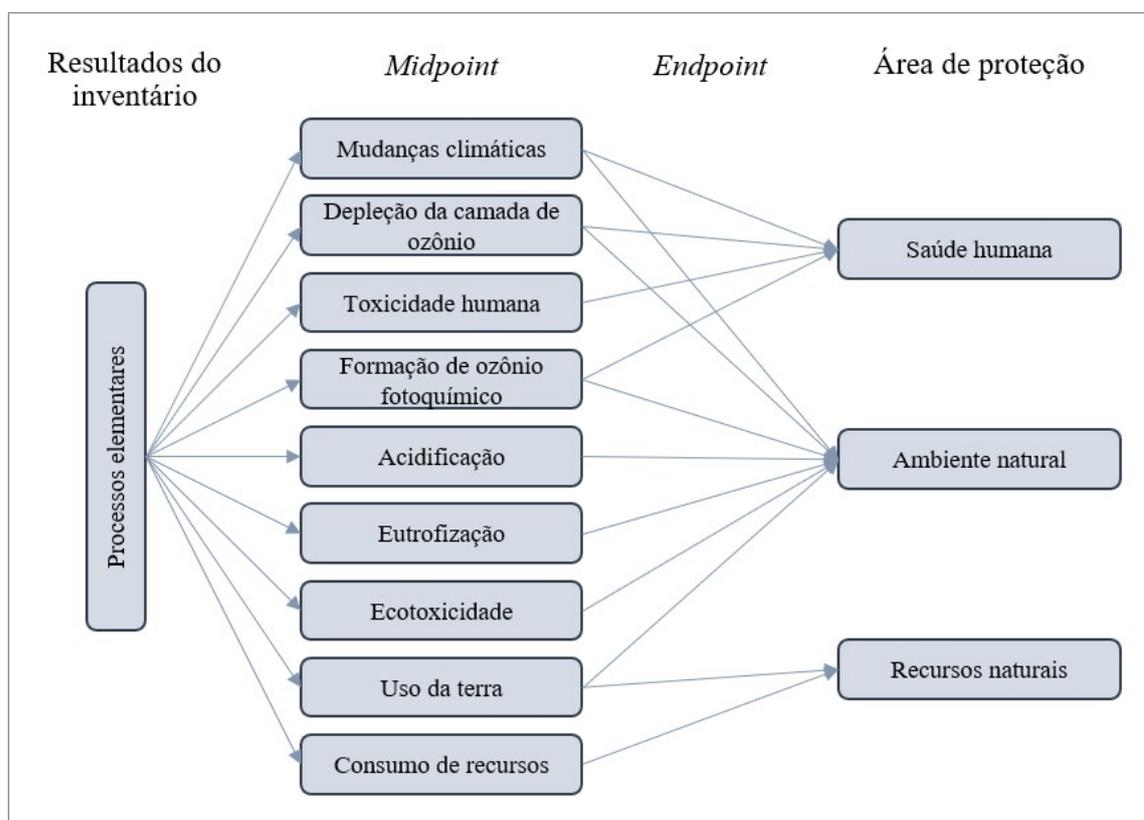
Quadro 2 – Principais categorias de impacto (continuação)

Categoria de impacto	Escala	Exemplo de dados do ICV	Descrição do fator de caracterização	Efeitos
Uso da água	Local e regional	Água utilizada ou consumida.	Converte os dados do inventário para uma quantidade proporcional de água utilizada versus a quantidade de recurso na reserva.	Perda de água disponível a partir de fontes de água subterrâneas e superficiais.

Fonte: Adaptado de EPA (2006).

2.2.3.4 Metodologia de impacto

Diversos métodos podem ser utilizados para AICV. Esses métodos possuem diversas categorias de impacto. Segundo Mendes, Bueno e Ometto (2016), os métodos de AICV podem ser classificados quanto ao nível de avaliação de impacto (*midpoint* ou *endpoint*), cuja relação é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Nível de abordagem *midpoint* e *endpoint*

Fonte: Adaptado de European Commission (2010).

As abordagens podem ser definidas como:

- a) *Midpoint* – abordagem orientada aos problemas ambientais antes de chegar no atributo (ponto) final da categoria. Geralmente, é usado um número maior de categorias e os resultados são mais precisos (EUROPEAN COMMISSION, 2010);
- b) *Endpoint* – abordagem orientada aos danos, ou seja, possui foco no efeito final dos problemas ambientais, considerando todo o processo ambiental até o ponto final da categoria.

A maioria dos métodos de AICV foram desenvolvidos na Europa, o Quadro 2 indica uma lista dos principais métodos e suas características (origem, nível de abordagem e as categorias de impacto utilizadas). Observa-se a necessidade do desenvolvimento de métodos baseados no contexto brasileiro.

Quadro 2 – Principais métodos de AICV e suas características

Método	Origem	Nível de abordagem	Categorias de impacto tradicionais
CML2002	Holanda	<i>Midpoint</i>	Depleção de recursos abióticos Depleção de recursos bióticos Uso da terra Mudança climática Depleção do ozônio estratosférico Toxicidade humana Ecotoxicidade aquática (água doce) Ecotoxicidade aquática (marinha) Ecotoxicidade terrestre Formação de foto-oxidantes Acidificação Eutrofização
Eco-indicator 9	Holanda	<i>Endpoint</i>	Mudança climática Depleção da camada de ozônio Acidificação e eutrofização combinadas Ecotoxicidade Radiação ionizante Uso da terra Recursos minerais Recursos fósseis
EDIP 1997	Dinamarca	<i>Midpoint</i>	Aquecimento global Ambiente de trabalho Depleção de ozônio Acidificação Enriquecimento de nutrientes Formação de ozônio fotoquímico Toxicidade humana Ecotoxicidade Consumo de recursos
EDIP 2003	Dinamarca	<i>Midpoint</i>	Aquecimento global Depleção de ozônio Acidificação Eutrofização terrestre Eutrofização aquática Formação de ozônio fotoquímico Toxicidade humana Ecotoxicidade
EPS 2000	Suécia	<i>Endpoint</i>	Saúde humana Consumo de recursos naturais Esgotamento de reservas de elementos Esgotamento de reservas fósseis (gás) Esgotamento de reservas fósseis (petróleo) Esgotamento de reservas fósseis (carvão) Esgotamento de reservas minerais

Quadro 2 – Principais métodos de AICV e suas características (continuação)

Método	Origem	Nível de abordagem	Categorias de impacto tradicionais
IMPACT 2002+	Suíça	Combinado	Toxicidade humana Depleção de ozônio Formação de ozônio fotoquímico Ecotoxicidade aquática Ecotoxicidade terrestre Acidificação aquática Eutrofização aquática Acidificação e eutrofização terrestre Ocupação do solo Aquecimento global Uso de energia não renovável Extração mineral
LIME	Japão	Combinado	Aquecimento global Depleção da camada de ozônio Toxicidade humana Ecotoxicidade Acidificação Eutrofização Formação de oxidantes fotoquímicos Uso da terra Consumo de minerais Consumo de energia Consumo de recursos bióticos
MEEuP	Holanda	<i>Midpoint</i>	Consumo total de energia bruta Consumo de eletricidade Consumo de água (processos) Consumo de água para resfriamento Aquecimento global Destruição do ozônio estratosférico Acidificação Toxicidade humana Formação de partículas Eutrofização aquática
ReCiPe	Holanda	Combinado	Mudança climática Depleção de ozônio Acidificação terrestre Eutrofização (água doce e marinha) Toxicidade humana Formação de oxidantes fotoquímicos Formação de matéria particulada Ecotoxicidade (terrestre, água doce, marinha) Uso do solo agrícola Uso do solo urbano Esgotamento de recursos fósseis Esgotamento de recursos minerais Esgotamento de recursos de água doce
TRACI	Estados Unidos	<i>Midpoint</i>	Depleção de ozônio Aquecimento global Formação de fumaça (<i>smog</i>) Acidificação Eutrofização Saúde humana (carcinogênicos) Saúde humana (não carcinogênicos) Saúde humana (poluentes) Ecotoxicidade Esgotamento de combustíveis fósseis Uso da terra Uso da água
IMPACT World+	Canadá, Estados Unidos, Suíça, Dinamarca, França	Combinado	Toxicidade humana Oxidação fotoquímica Depleção da camada de ozônio Aquecimento global Ecotoxicidade Acidificação Eutrofização Uso da água Uso da terra Uso de recursos

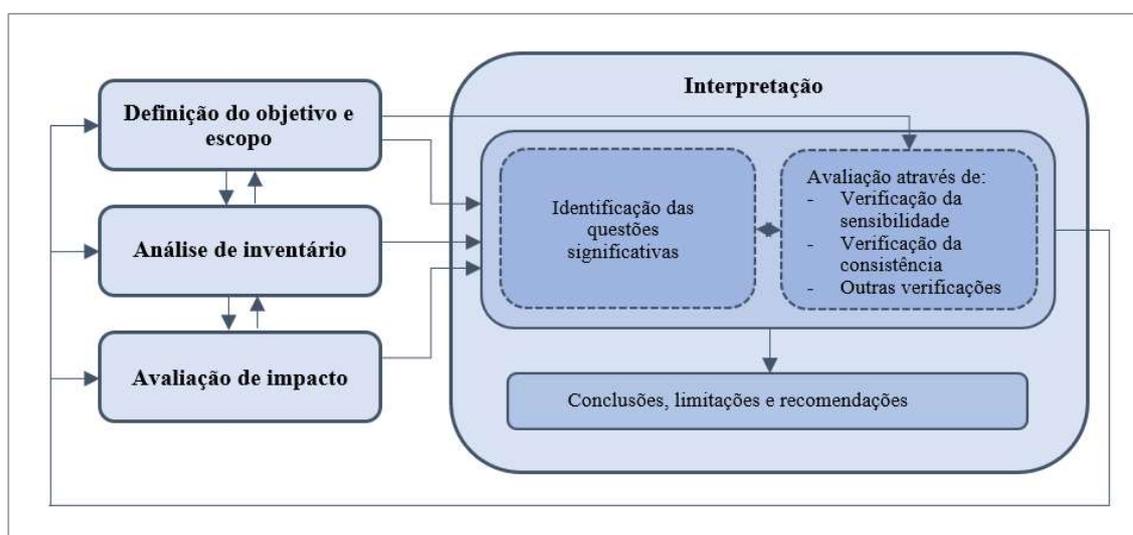
Fonte: Adaptado de Mendes, Bueno e Ometto (2016).

2.2.4 Interpretação do ciclo de vida

A interpretação do ciclo de vida possui caráter interativo com as outras três fases da ACV. A NBR ISO 14044 destaca nessa etapa os seguintes elementos: identificação de questões significativas com bases nos resultados das fases de ICV, AICV da ACV; avaliação do estudo, considerando as verificações de completeza, sensibilidade e consistência; esboço das principais conclusões, limitações e recomendações, vide Figura 6.

Nesta fase, ocorre a verificação da consistência dos resultados com relação à primeira fase de definição do objetivo e escopo e a partir das conclusões da interpretação do ciclo de vida pode-se chegar a conclusões, identificação de limitações e recomendações de melhorias sobre o sistema de produto.

Figura 6 – Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV



Fonte: ABNT NBR ISO 14044 (2009b).

A etapa de identificação das questões significativas ocorre através da estruturação dos resultados do ICV ou AICV. Para ajudar nesse processo, os resultados podem ser estruturados segundo dados do inventário (energia, emissões, descargas e resíduos), categorias de impacto ou contribuições relevantes dos estágios do ciclo de vida.

Após a estruturação dos dados, a segunda etapa é a avaliação do estudo, onde os resultados são avaliados segundo verificações de completeza, sensibilidade e consistência. A verificação de completeza objetiva assegurar que todos os dados (entradas, saídas e impactos) estejam completos de forma a satisfazer os objetivos e escopo definidos. Caso haja alguma

informação faltante ou incompleta, as fases anteriores da ACV podem ser revisadas ou ajustadas.

A verificação da sensibilidade busca avaliar de que forma os resultados são afetados por incertezas, estimativas, procedimentos de cálculo, hipóteses e outras limitações impostas. Uma forma prática é realizar a análise através da construção de cenários com casos melhores ou piores ou através da variação de valores de entrada em comparação com os resultados do cenário de referência (CHEHEBE, 2002). Por fim, a verificação da consistência visa avaliar se os pressupostos, métodos e dados estão consistentes com o objetivo e escopo do estudo (ABNT, 2009b). Consecutivo a etapa de avaliação, são traçadas as conclusões, limitações e recomendações do estudo.

2.3 Softwares de apoio à ACV

O processo de avaliação do ciclo de vida pode ser auxiliado por programas computacionais para a modelagem dos processos e sistemas de produtos. Os *softwares* de ACV auxiliam principalmente a análise de impactos ambientais, sendo capazes de processar os dados do inventário em categorias de impacto ambientais a depender do método de impacto escolhido. Além disso, alguns *softwares* podem incluir modelagem gráfica, relatórios gerenciais, diagramas de fluxos e interpretação de resultados. O Quadro 3 apresentam os principais *softwares* de apoio à ACV.

A maior parte dos *softwares* foram desenvolvidos na Europa e Estados Unidos, alguns são disponíveis para compra e outros são disponibilizados gratuitamente. Há uma carência de programas que levem em consideração a legislação ambiental brasileira. Na maior parte, os pesos das categorias de impacto ambiental são estáticos com base em padrões europeus e americanos (SANTOS, 2011).

Quadro 3 – *Softwares* de avaliação do ciclo de vida

Software	País	Descrição	Fonte ou endereço na internet
Air.e LCA	Espanha	O <i>software</i> auxilia no desenvolvimento de produtos mais sustentáveis através da ACV e permite a integração dos aspectos ambientais e econômicos. Também realiza cálculos de pegada hídrica e de carbono.	https://www.solidforest.com/software-huella-ambiental.html
Aveny LCA	Suíça	O <i>software</i> realiza análises avançadas voltadas para sustentabilidade de produtos, incluindo análise da cadeia de suprimentos e avaliação de incertezas. Também permite a colaboração em tempo real de especialistas no projeto.	https://www.avenylca.com/features/
BEES	Estados Unidos	O BEES (<i>Building for Environmental and Economic Sustainability</i>) foi desenvolvido pelo NIST (<i>National Institute of Standards and Technology</i>) para medir o desempenho ambiental de produtos de construção. Indicado para construtores, projetistas, consumidores e fabricante de produtos de construção.	https://www.nist.gov/services-resources/software/bees
CMLCA	Holanda	O CMLCA (<i>Chain Management by Life Cycle Assessment</i>) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden. Suporta o cálculo da ACV, incluindo aspectos social e econômicos, além da sustentabilidade.	http://www.cmlca.eu/
EASETECH	Dinamarca	O EASETECH (<i>Environmental Assessment System for Environmental TECHNOlogies</i>), desenvolvido pela Universidade Técnica da Dinamarca, possui foco na modelagem de fluxos de material de sistemas complexos.	http://www.easetech.dk/
EIME	França	O programa realiza análises ambientais de produtos e serviços, bem como auxilia na emissão de declarações ambientais.	https://codde.fr/nos-logiciels/presentation-eime
eToolLCD	Austrália	O <i>software</i> é voltado para uso em edificações com flexibilidade para todos os tipos de projetos. Além dos indicadores ambientais, o programa também inclui o impacto nos custos.	https://etoolglobal.com/about-etoollcd/
GaBi	Alemanha	O <i>software</i> é voltado para auxiliar avaliação do ciclo de vida, custeio do ciclo de vida, declarações ambientais de produtos, ecodesign e pegada de carbono.	http://www.gabi-software.com/international/overview/what-is-gabi-software/
GREET	Estados Unidos	O GREET (<i>Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model</i>) é voltado realizar análises de impactos ambientais em diferentes tecnologias de veículos e combinações de combustíveis.	https://greet.es.anl.gov/net
IDEMAT	Holanda	O programa é indicado para o início do processo de design para comparar materiais e processos com base nos impactos ambientais.	http://idematapp.com/#home
LCAPIX	Estados Unidos	O LCAPIX (<i>Life Cycle Assessment Process Index Software</i>) integra análises de ciclo de vida e custo do ciclo de vida, sendo capaz de indicar a carga potencial de qualquer produto.	http://www.kmlmtd.com/index.htm
MiLCA	Japão	O <i>software</i> realiza cálculos de ACV e pegadas de carbono, possibilitando a medição dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de produtos e serviços.	https://www.milca-milca.net/english/index.php
OpenLCA	Alemanha	O OpenLCA é um <i>software</i> de código aberto que permite a integração da avaliação de sustentabilidade com avaliação social e custeio do ciclo de vida.	http://www.openlca.org/
SimaPro	Holanda	O <i>software</i> realiza análises de desempenho de sustentabilidade de produtos e serviços e pode ser usado para cálculo da pegada de carbono e água, declarações ambientais, design de produtos e indicadores de desempenho.	https://simapro.com/about/
SULCA	Finlândia	O SULCA (<i>Sustainability tool for Ecodesign, Footprints & LCA</i>) foi desenvolvido para realizar análises de sustentabilidade e cálculo de pegadas ambientais (carbono e água).	https://www.simulationstore.com/sulca
REGIS	Suíça	Programa voltado para a avaliação do desempenho ambiental de corporações.	https://sinum.com/regis
Umberto	Alemanha	O Umberto permite a combinação da ACV com análises de custo integradas e inclui a modelagem gráfica e o cálculo de pegadas ecológicas.	https://www.ifu.com/en/umberto/lca-software/

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

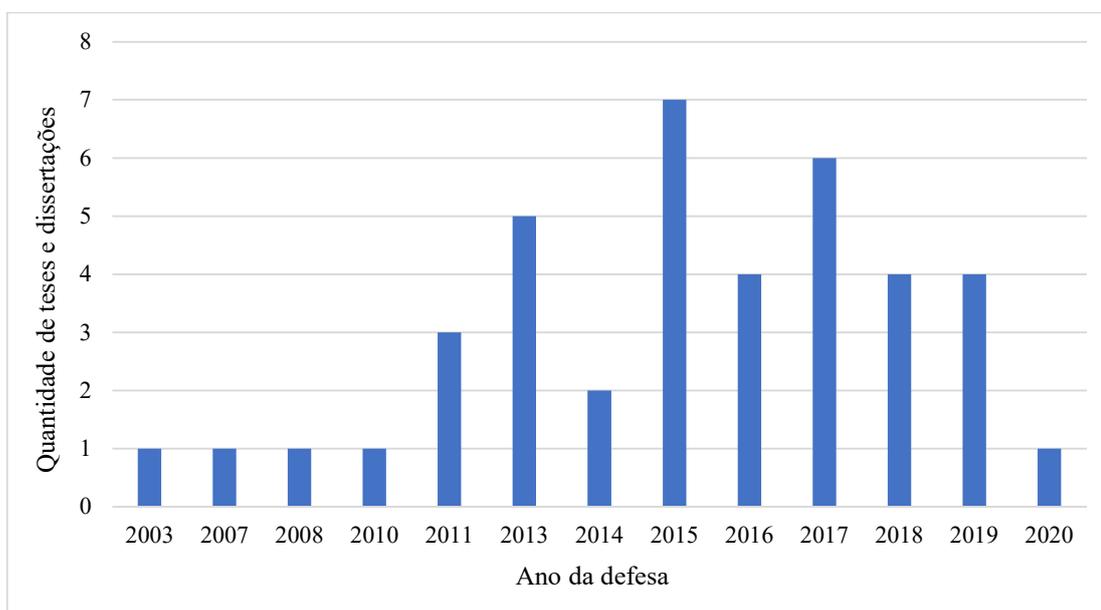
2.4 ACV na construção civil

O setor da construção civil possui oportunidades consideráveis para melhorias sustentáveis a começar pela seleção consciente de materiais, racionalização do consumo de água e energia, uso de melhores práticas construtivas, reaproveitamento de materiais reciclados e resíduos e a redução do consumo de recursos naturais. Com a tendência de produtos mais sustentáveis, é fundamental o desenvolvimento de metodologias para avaliação ambiental de edifícios e materiais de construção para alcançar níveis mais elevados de desempenho ambiental no setor. Nesse sentido, a abordagem ACV pode contribuir de modo eficaz na quantificação das questões ambientais associadas a produtos e processos da construção civil.

No Brasil, diversos produtos e processos construtivos foram avaliados através da metodologia ACV. Através de um levantamento na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), que integra sistemas de informação de diversas instituições de pesquisa no país, foram consultados os resumos de teses e dissertações com o tema “avaliação do ciclo de vida” e “construção civil”. No total, foram encontrados 40 trabalhos, sendo 32 dissertações e 8 teses de doutorado. As principais universidades que desenvolveram pesquisas na área foram a Universidade de São Paulo e Universidade Brasília.

O Gráfico 1 apresenta o perfil cronológico dos estudos de ACV voltados para a construção civil. As defesas de teses e dissertações com o tema iniciaram a partir do ano 2003, com crescimento a partir de 2011, sendo 2015 o ano mais produtivo. Entre assuntos abordados, foram identificados estudos em agregados naturais (ROSSI, 2013), materiais cimentícios com uso de resíduos (ASSUNÇÃO, 2020; LEITE, 2019; MELLO, 2018; RIGON, 2015), edificações (MADEIRA, 2019; PIVA, 2019; SARTORI, 2018), gerenciamento de resíduos (ROSADO, 2015), blocos cerâmicos (VINHAL, 2016; SOMBRIO, 2015), estruturas de concreto armado (BENTO, 2016), sistemas de vedações (PEDROSO, 2015), entre outros.

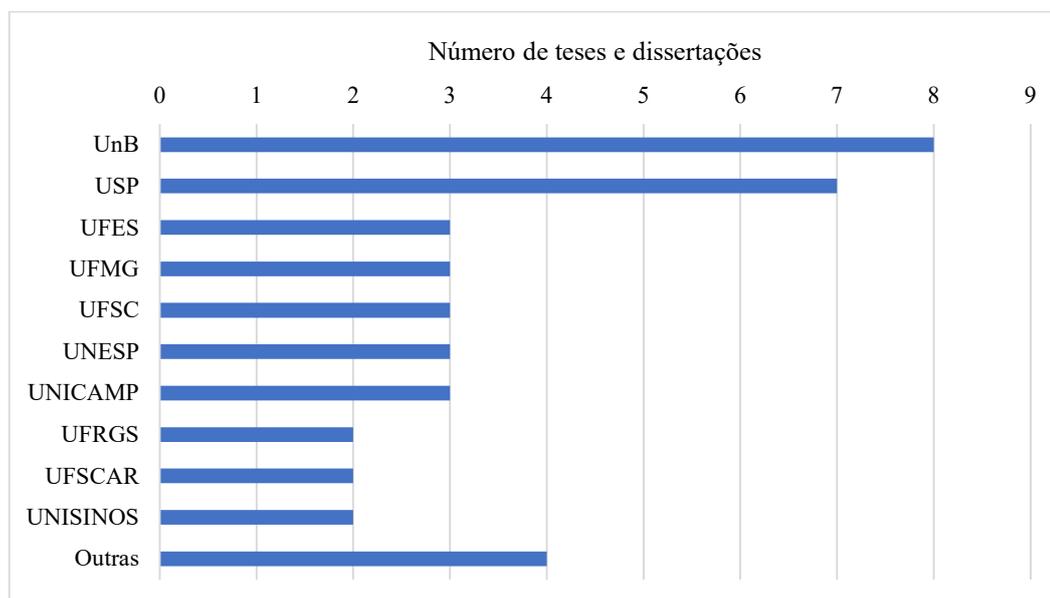
Gráfico 1 – Quantidade de teses e dissertações de estudos de ACV voltados para a construção civil por ano de defesa



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Através da pesquisa no sistema eletrônico, também se obteve a distribuição do número de teses e dissertações sobre o tema defendidas nas universidades brasileiras (Gráfico 2). Vale ressaltar que alguns trabalhos acadêmicos podem não estar contemplados nos registros dos sistemas de informações da BDTD, portanto, o número de produções pode ser ainda maior.

Gráfico 2 – Distribuições de teses e dissertações de estudos de ACV voltados para a construção civil nas universidades



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

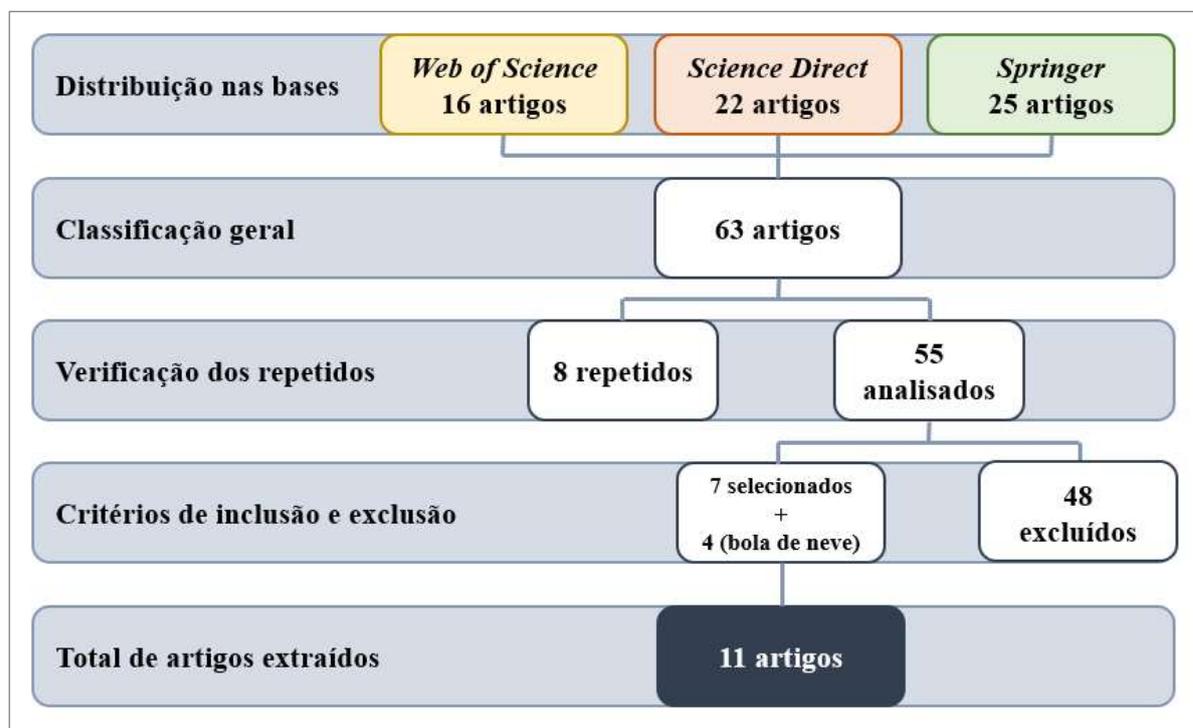
A ACV pode ser aplicada em diversos produtos e processos construtivos e tem sido muito difundida nas instituições de pesquisa no Brasil. Com aumento das preocupações ambientais, a ACV pode auxiliar a tomada de decisão principalmente quanto aos questionamentos ambientais para a seleção consciente entre materiais tradicionais e novos materiais com uso de resíduos.

2.5 Revisão sistemática sobre ACV aplicada em agregados

A seleção da literatura sobre estudos de ACV em agregados para construção civil contemplando as etapas produtivas industriais foi realizada através de uma revisão sistemática. O processo da revisão sistemática observou quatro etapas principais: (i) identificação e seleção dos artigos nas bases, (ii) classificação geral dos artigos, (iii) verificação dos repetidos e (iv) aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, conforme mostrado na Figura 7. O modo de busca foi feito de forma sistematizada nas bases de dados *Web of Science*, *Science Direct* e *Springer*, bases que concentravam as principais publicações na área. Na base *Springer*, a busca foi restringida ao periódico intitulado “*International Journal of Life Cycle Assessment*”, periódico voltado para publicações em ACV.

As publicações avaliadas foram artigos científicos, excluindo capítulos de livro e artigos publicados em congressos científicos. Na busca das publicações, foi também utilizada a abordagem “Bola de Neve” (*Snowball Sampling*), a técnica consiste em identificar, a partir das referências dos artigos, outros estudos relevantes que não constaram na busca inicial (BIERNACKI, P.; WALDORF, D., 1981). Para realizar a seleção, foram definidas as principais palavras-chaves em inglês relacionadas com o tema do trabalho: *life cycle assessment; life cycle costing; lightweight aggregates; recycled concrete aggregate; expanded clay; economic impact; environmental impact*. Em português, as palavras-chaves equivalem a: avaliação do ciclo de vida, custeio do ciclo de vida, agregados leves, agregados de concreto reciclado, argila expandida, impacto econômico e impacto ambiental. Desse modo, a busca deveria conter no título do artigo as palavras-chaves definidas para cada base de dados.

Figura 7 – Distribuição dos artigos nas bases de dados



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Em todas as bases de dados foram consideradas publicações no período de 2010 até março de 2020. Posteriormente foram eliminados aqueles que apareceram em mais de uma base de dados para aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Os critérios de inclusão se restringiram aos estudos que abordavam a aplicação da metodologia ACV nas etapas de produção de agregados leves ou reciclado, especificando o processo produtivo (etapas, equipamentos, transporte, por exemplo); do mesmo modo, os critérios de exclusão eliminaram os estudos que não especificavam a etapa fabricação dos agregados e artigos não disponíveis por completo.

No total foram selecionados 7 documentos na busca inicial, sendo 4 na abordagem bola de neve, totalizando 11 artigos. A busca geral identificou um número maior de artigos (55 artigos), mas alguns abordavam o tema de forma indireta ou tratava de estudos de ACV em concretos ou argamassas sem abordar com detalhes as etapas de produção dos agregados. Portanto, foram selecionados sistematicamente apenas os artigos que tratam do tema.

A estratégia de extração de dados permitiu identificar de cada artigo: nome, ano de publicação, filiação dos autores, periódico de publicação, tipo de agregado utilizado, unidade funcional, fronteira, tipos de dados do inventário, método de avaliação de impactos e software de apoio. Os dados foram sumarizados através do Quadro 4, onde foi possível comparar os resultados da revisão sistemática.

Quadro 4 – Síntese da revisão sistemática

Autor (es)	Ano	Filiação	Periódico	Tipo de agregado	Estudo sobre ACV				
					Unidade funcional	Fronteira	Dados do inventário	Método de avaliação	Software de apoio
Park <i>et al.</i>	2019	Coreia do Sul	<i>Applied Sciences-Basel</i>	Agregado reciclado de RCD	1 kg	Berço ao portão	Dados primários	Não especificado	Não especificado
Martinez-Arguellez <i>et al.</i>	2019	Colômbia	<i>Transportation Research Record</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	1 ton	Berço ao portão	Dados primários e secundários (Ecoinvent 3.0 e U.S. LCI)	Impacto 2002+	SimaPro 8.4
Ingrao <i>et al.</i>	2018	Itália	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	Argila expandida	1 m ³	Produção (gate to gate)	Dados primários e secundários (Ecoinvent)	Impacto 2002+	SimaPro 8.1
Cuenca-Moyano <i>et al.</i>	2018	Espanha	<i>The International Journal of Life Cycle Assessment</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	1 ton	Berço ao portão	Dados primários e secundários (Ecoinvent)	LMC-IA e ILCD	SimaPro 8.0.2
Ghanbari <i>et al.</i>	2017	Irã	<i>Journal of Material Cycles and Waste Management</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	480.000 ton	Berço ao túmulo	Dados primários	Não especificado	Não especificado
Rosado <i>et al.</i>	2017	Brasil	<i>Journal of Cleaner Production</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	1 ton	Berço ao local da obra (naturais) e portão ao local da obra (reciclado)	Dados primários e secundários (Ecoinvent 3.01, EU&DK Input Output e US LCI)	Impact 2002+	SimaPro 8.0.2
Estanqueiro <i>et al.</i>	2016	Portugal	<i>European Journal of Environmental and Civil Engineering</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	1 ton	Berço ao local da obra	Dados primários	Ecoindicator 99, CML 2000 baseline e demanda acumulada de energia.	SimaPro
Napolano <i>et al.</i>	2016	Itália	<i>Construction and Building Materials</i>	Agregados artificiais de argila e resíduos industriais	1 m ³	Berço ao portão	Dados primários e secundários (Ecoinvent 2.2)	Impact 2002+	SimaPro 7.3
Hossain <i>et al.</i>	2016	Hong Kong	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	1 ton	Berço ao local da obra	Dados primários e secundários (CLP, CLCD, ELCD)	Impact 2002+	SimaPro 8.0.1
Faleschini <i>et al.</i>	2016	Itália	<i>Waste Management</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	1 ton	Berço ao portão	Dados primários	CML 2002	Não especificado
Gan <i>et al.</i>	2015	Hong Kong	<i>Journal of Cleaner Production</i>	Agregados naturais e reciclados de RCD	1 kg	Berço ao local da obra	Dados primários	Impact 2002 +	Não especificado

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: RCD – resíduos de construção e demolição.

Park *et al.* (2019) aplicaram a metodologia ACV na produção de agregados reciclados de RCD na Coreia do Sul. Os estágios da produção incluídos foram: coleta das matérias-primas, transporte e fabricação dos agregados. A fabricação dos agregados foi subdividida em dois modos de produção: método seco e método úmido. O método seco permite a eliminação da argamassa da superfície dos agregados através de etapas de trituração e separação de pó para produzir agregados de melhor qualidade. O método úmido é usado para produção de volumes elevados, entretanto, requer um custo inicial significativo e espaço maior para outros equipamentos (limpeza, precipitador, filtros de prensa). Os resultados da avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) indicaram que os agregados reciclados pelo método úmido apresentaram impactos ambientais maiores que o método seco em todas as categorias. Dentre os estágios de produção considerados, a fase de coleta das matérias-primas é responsável pela maior proporção do potencial de formação de oxidantes fotoquímicos, enquanto a fase de transporte foi responsável por 81% do potencial de esgotamento dos recursos abióticos.

Martinez-Arguellez *et al.* (2019) aplicaram os conceitos da ACV na produção de agregados naturais em comparação com uma composição combinada de agregados naturais e reciclados de RCD na Colômbia. Para os dois processos de produção, o consumo do combustível (óleo diesel) foi o parâmetro considerado mais crítico, sendo o principal responsável pelos impactos negativos na categoria de inorgânicos inaláveis, aquecimento global e energia não renováveis. A produção combinada estudada é de 70% de agregado natural e 30% de RCD e apresentou um melhor desempenho em relação aos impactos ambientais de 9 das 15 categorias de impacto orientadas a problemas (*midpoint*). Para as categorias de impacto orientada a danos (*endpoint*), a produção combinada apresentou menores impactos ambientais para todas as categorias de danos, com reduções que variam entre 17% e 23%. Os autores estimam uma distância máxima de transporte do RCD de 30 km, para assegurar benefícios ambientais em relação a produção de agregados naturais.

Ingrao *et al.* (2019) estudaram os impactos ambientais da produção da argila expandida com dois tipos diferentes de combustíveis (palha de cereais e carvão) na Itália. A produção com uso de carvão apresentou impactos ambientais mais elevados do que com a utilização da palha, principalmente por causa das emissões de CO₂ geradas pela queima do carvão. O estudo aponta que a substituição de combustíveis fósseis por biomassa renovável, como resíduos agrícolas, pode auxiliar a gestão de resíduos e conservação dos recursos naturais. Além disso, o uso da palha como combustível pode representar uma oportunidade para empresas voltadas ao ramo da agricultura ampliarem a oferta de produtos e o atendimento às exigências de uma cultura mais sustentável.

Cuenca-Moyano *et al.* (2018) utilizaram a metodologia ACV para comparar processos de produção de agregados naturais e reciclados na Espanha. Os resultados mostraram que a produção de agregados naturais em relação aos agregados reciclados gerou impactos ambientais maiores em todas as categorias. A redução mais significativa (-3505%) foi na categoria uso da terra, pois a reciclagem do RCD evita a disposição do resíduo em aterros, conseqüentemente, ocorre uma redução da ocupação do solo. Reduções significativas também ocorreram nas categorias de depleção abiótica de combustíveis fósseis (-438%), depleção da camada de ozônio (-376%), material particulado (-275%) e potencial de formação de oxidantes fotoquímicos (-205%). Dentre as etapas da produção dos agregados naturais, o processo de trituração da dolomita (rocha) foi o que mais gerou impactos em quase todas as categorias, exceto nas categorias de depleção abiótica de elementos e uso da terra. Na produção dos agregados reciclados, o transporte do RCD do local de geração até a fábrica causou o maior impacto em todas as categorias, o segundo maior contribuinte foi o processamento do RCD.

Ghanbari *et al.* (2017) realizaram uma avaliação econômica e ambiental da produção de agregados em três cenários no Irã. O primeiro cenário considerou a produção de agregados naturais, o segundo cenário analisou a produção de agregados reciclados de RCD e o terceiro cenário (híbrido) representou uma combinação da produção de agregados naturais e reciclados (porcentagem de mistura de 50%). A avaliação ambiental teve por objetivo consumo de energia primária e emissões de CO₂. Para o primeiro cenário, foram estimados o consumo anual de 1,48 milhões de toneladas equivalentes de petróleo e 2,88 milhões de toneladas equivalentes de emissões de CO₂ por ano para a produção de agregados naturais. Os autores citam que as emissões de CO₂ são mais sensíveis a equipamentos movidos a diesel e o consumo de energia é mais sensível para equipamentos elétricos. O segundo cenário não apresentou resultados satisfatórios, além da alta especificação técnica exigida para o uso do RCD, o que torna sua implementação questionável. O cenário híbrido apresentou valores médios de energia e emissões de CO₂ entre o primeiro e segundo cenário. Isso ocorre, devido a um menor uso de equipamentos a diesel (em especial, nas fases de extração e esmagamento dos agregados presentes no primeiro cenário) e menor uso de equipamentos elétricos (em relação ao segundo cenário). Portanto, o cenário híbrido foi o mais aceitável na redução do consumo de energia (aproximadamente 30%) e diminuição das emissões de CO₂ (redução de 36%) dentro de um período de 20 anos.

Rosado *et al.* (2017) estudaram os impactos ambientais da produção de agregados naturais e reciclados de RCD no Brasil. Os resultados mostraram que a explosão da pedra associada a produção de agregados naturais tem uma contribuição de 75% na categoria de

inorgânicos inaláveis e 96% na categoria de ecotoxicidade terrestre, principalmente devido ao uso de explosivos e diesel. O transporte dos agregados naturais ao consumidor final tem um impacto de 40% na categoria de aquecimento global. Em relação a produção de agregados reciclados, os impactos estão relacionados aos processos que consomem diesel e contribuem para as categorias de aquecimento global, energia não renovável e inorgânicos inaláveis. Para os autores, a produção de agregados reciclados de RCD é vantajosa, visto que requer menos etapas e evita cargas ambientais.

Estanqueiro *et al.* (2016) realizaram uma ACV comparativa entre agregados naturais e reciclados (RCD) utilizando diferentes métodos para avaliar os impactos ambientais. O processo de reciclagem dos agregados foi avaliado comparando-se a demolição tradicional com a demolição seletiva, que maximiza a recuperação dos resíduos. O estudo concluiu que o uso de agregados reciclados na produção de concretos foi mais favorável apenas nas categorias de uso da terra e inorgânicos inaláveis. Também foi constatado a que a demolição seletiva em vez da demolição tradicional pode reduzir aproximadamente 23% dos impactos ambientais dessa operação. Sendo assim, a reciclagem dos agregados de RCD deve ocorrer em um processo otimizado para alcançar a sustentabilidade e a demolição seletiva é bastante eficiente nesse processo. Os autores também afirmam que os resultados são muito sensíveis às distâncias de transporte, especialmente, da localização da pedreira, do local de demolição e da usina de concreto.

Napolano *et al.* (2016) utilizaram a metodologia de ACV para agregados artificiais leves produzidos a partir de resíduos industriais e de argilas naturais (argila expandida). Os resíduos industriais são oriundos do corte de rochas (conhecidas por “zeolite” e “serizzo”) e do polimento de azulejos de porcelana na Itália). Segundo os autores, o processo dos agregados leves de argilas é de aproximadamente uma ordem de grandeza maior que os valores correspondentes aos agregados leves de resíduos. Na categoria de recursos, categoria de impacto orientada a danos, por exemplo, os resultados foram $3.67E+02$ MJ para os agregados produzidos com 100% do resíduo “zeolite” e $2.74E+03$ MJ para os agregados produzidos com 100% de argila natural. Os autores indicam que isso ocorre devido ao óleo combustível pesado usado processo de expansão dos agregados de argila expandida, o que determina um impacto ambiental 90% maior em relação ao processo de produção agregados leves de resíduos. Os resultados revelam que a produção dos agregados artificiais leves produzidos com resíduos industriais apresentaram carga ambiental significativamente menor no que diz respeito à produção de agregados por argila expandida. Isso se deve principalmente a duas etapas significativas, o fornecimento da matéria-prima e o processo de produção das argilas. Os

autores concluem que a extração de argila, o seu transporte e a fase de produção (incluindo queima de argila e expansão com óleo combustível pesado) contribuem fortemente para os impactos ambientais de agregados leves de argila expandida.

Hossain *et al.* (2016) estudaram os impactos ambientais da produção de agregados naturais em comparação com agregados reciclados de RCD e resíduos de vidro. Os autores indicam que benefícios ambientais podem ser alcançados com a produção dos dois tipos de agregados reciclados. Os agregados graúdos de RCD em relação aos agregados graúdos naturais reduzem 65% das emissões de gases de efeito estufa e 58% de economia no consumo de energia renovável. Os agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de vidro reduziram 61% das emissões de gases de efeito estufa e apresentaram uma economia de 54% no consumo de energia comparados com agregados miúdos naturais. O estudo indicou ainda que 49-51% dos impactos ambientais podem ser evitados ao optar pela produção de agregados de RCD em comparação com os naturais.

Faleschini *et al.* (2016) de modo semelhante aplicaram a ACV para quantificar os impactos ambientais de agregados naturais e reciclados de RCD na Itália. Segundo os autores, a cadeia produtiva dos agregados naturais é responsável por impactos ambientais mais elevados do que os agregados reciclados. Além disso, pelo fato de as instalações de reciclagem serem escassas em comparação com a demanda do mercado, os autores citam que há possibilidade de fábricas com produções associadas de agregados naturais e reciclados auxiliarem na redução das cargas ambientais. Os autores mencionam que o uso da terra e a preservação de recursos naturais são difíceis de serem quantificados pela estrutura da ACV, pois são fatores que requerem uma abordagem específica cada local e, geralmente, os trabalhos nessa área carecem de uma avaliação mais adequada desses impactos.

Gan *et al.* (2015) integraram os conceitos de ACV e o método de otimização multiobjetivo em três tipos de agregados em Hong Kong, agregados naturais locais, agregados reciclados de RCD local e agregados naturais importados. Os resultados mostraram que os agregados reciclados apresentaram melhor desempenho ambiental. O consumo de eletricidade e o transporte do produto até os consumidores são os processos mais críticos. A razão é que os agregados reciclados necessitam de processos adicionais (separação manual e magnética, por exemplo), o que resulta em um consumo de eletricidade mais elevado. Além disso, os agregados naturais locais e os reciclados são transportados por caminhões basculantes, enquanto os agregados importados são trazidos por embarcações. Os autores também apontam que o transporte marítimo é mais eficaz para reduzir as emissões de material particulado na produção de agregados.

2.5.1 Considerações sobre a revisão sistemática

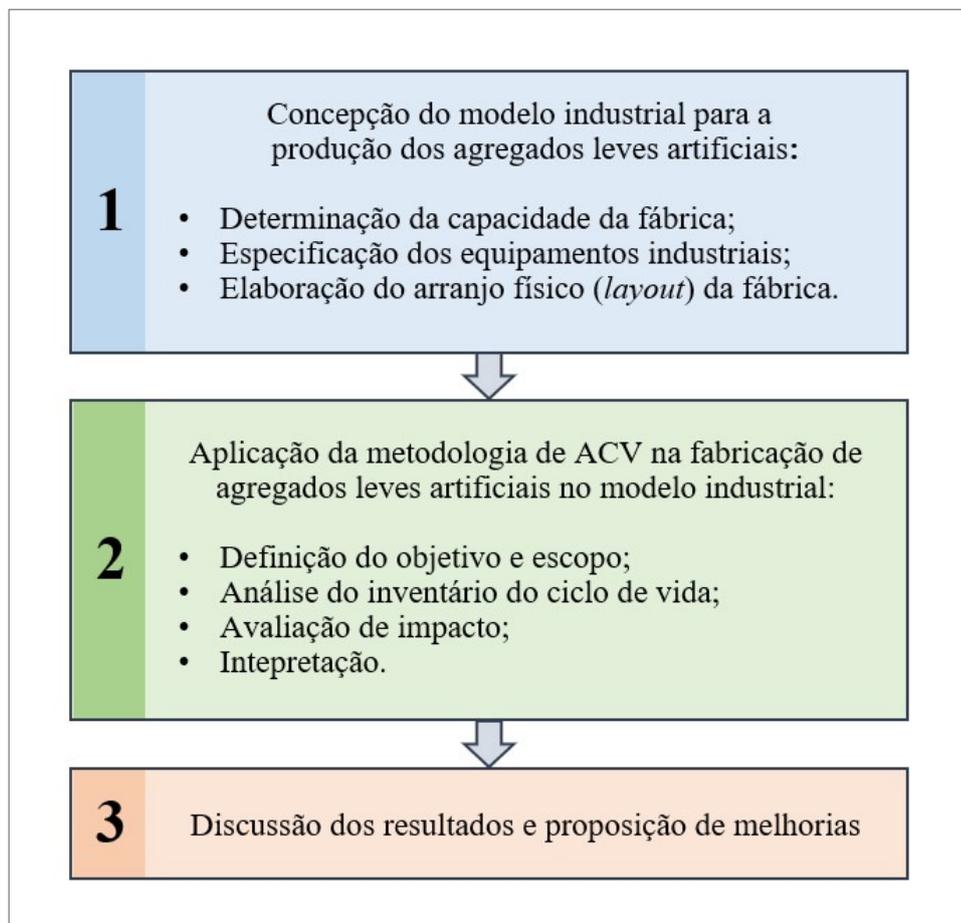
Com a elaboração da revisão sistemática, algumas considerações foram levantadas:

- A ACV é uma ferramenta bastante consolidada na identificação de impactos ambientais associados à produção de agregados naturais e reciclados;
- Diversos estudos foram identificados com aplicação da metodologia ACV principalmente na produção de agregados de RCD;
- Foram escassos os estudos de ACV voltados para a produção de agregados leves com uso de argila e resíduo industrial;
- Não foram encontrados estudos de ACV de agregados leves produzidos com argila do Nordeste brasileiro e resíduo do bagaço da cana-de-açúcar que detalhassem as etapas e o modelo industrial de produção;
- Agregados reciclados têm se mostrado uma solução importante para a redução dos impactos ambientais, em especial, associadas ao uso da terra (devido a não disposição de resíduos em aterros sanitários) e consumo de recursos naturais.

3 METODOLOGIA

A metodologia da dissertação foi desenvolvida em três etapas principais: *i*) concepção do modelo industrial para o desenvolvimento dos agregados leves artificiais; *ii*) aplicação da metodologia de ACV na fabricação de agregados leves artificiais em escala industrial; *iii*) discussão dos resultados e proposição de melhorias. A Figura 8 mostra as etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo, a metodologia de ACV é desenvolvida com base nas recomendações das normas brasileiras, NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) que regulamentam a condução dos estudos sobre ACV.

Figura 8 – Fases da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.1 Informações preliminares

O estudo desenvolvido por Souza (2019) sobre agregados leves artificiais foi utilizado para o levantamento de dados sobre parâmetros, composição das misturas e perdas de massa nas etapas produtivas. Atualmente, a produção dos agregados leves artificiais com uso de argila vermelha e resíduo de bagaço da cana-de-açúcar é desenvolvida pelo núcleo de pesquisa instalado no Laboratório de Durabilidade do IFRN. Os agregados leves artificiais de Souza (2019) foram produzidos de forma manual em escala laboratorial. Esse processo produtivo foi utilizado como base para a concepção de um hipotético modelo industrial. Posteriormente, o pressuposto modelo foi utilizado para avaliação ambiental de agregados leves em escala industrial.

Dessa forma, nesta pesquisa foram analisados o desempenho ambiental de três misturas de agregados leves (ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%) utilizando matérias-primas regionais, em especial, com alto teor do resíduo agroindustrial (Tabela 1). Os agregados com uso de resíduo (RBC-50% e RBC-90%) foram sinterizados à temperatura de 1175°C, com uso do RBC moído em moinho de bolas. O agregado de argila vermelha pura (ARG-V 100%) foi sinterizado à temperatura de 1200°C. As combinações foram escolhidas por apresentarem ótimos resultados quanto às propriedades de massa específica aparente, absorção de água e massa unitária, atendendo os requisitos necessários para agregados leves.

Tabela 1 – Composição das misturas analisadas

Nomenclatura	Argila vermelha	RBC	Massa específica aparente (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)
ARG-V 100%	100%	0%	1,62	0,89
RBC-50%	50%	50%	1,39	0,78
RBC-90%	10%	90%	1,34	0,7

Fonte: Souza (2019).

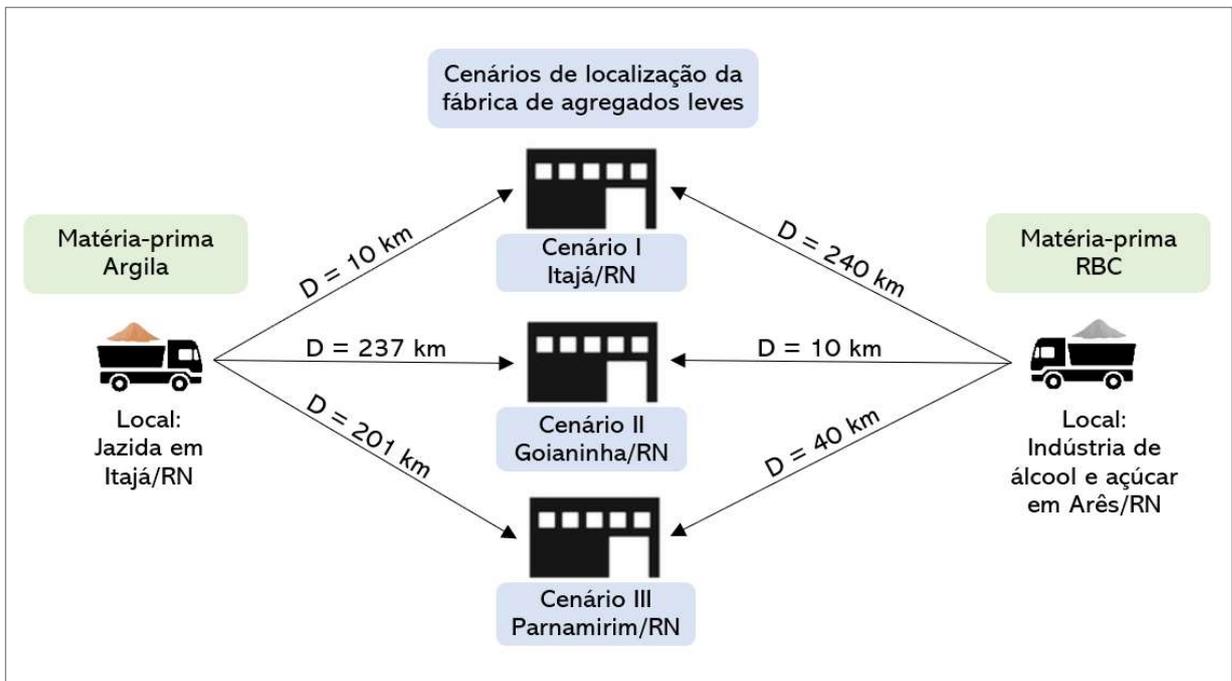
Quanto à origem dos materiais utilizados, a argila vermelha é extraída no município de Itajá/RN, na região Nordeste brasileira. A argila foi cedida por uma indústria cerâmica local, que foi utilizada para aplicação do questionário referente aos dados sobre extração e transporte de argila (Apêndice A). A argila é utilizada para fabricação de tijolos e telhas, cedida de forma natural (úmida e aglomerada). O RBC é proveniente de uma usina sucroalcooleira do município de Arês/RN, na região Nordeste brasileira. O resíduo é coletado diretamente no ponto de descarga de limpeza dos fornos da usina.

Os impactos ambientais da produção dos agregados leves foram quantificados considerando as condições atuais de origem das matérias-primas. É importante lembrar que, em uma análise mais detalhada, outros pontos de coleta das matérias-primas podem ser considerados a depender do local de instalação da fábrica.

3.2 Cenários de localização da fábrica

A localização de uma fábrica pode ser estudada por meio de diversos fatores, por exemplo custos de transporte, mão de obra, tempo de viagem, proximidade de vias de acesso e centros de distribuição (CLEMENTE; CONSENZA, 2002). Um estudo de localização é fundamental para garantir o equilíbrio entre custos operacionais e a maximização do nível serviço de uma empresa. Neste estudo, a localização da empresa foi analisada em três cenários (Figura 9), levando consideração a proximidade de obtenção das matérias-primas e potenciais centros distribuição. Os municípios do Rio Grande do Norte escolhidos foram Itajá, Goianinha e Parnamirim. A Figura 10 mostra a localização dos cenários no mapa do Rio Grande do Norte.

Figura 9 – Cenários de localização da fábrica de agregados leves



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: D – distância.

Figura 10 – Mapa dos cenários de localização no Rio Grande do Norte



Fonte: Mapa adaptado de Raphael Lorenzeto de Abreu (2011).

No cenário I, a fábrica está localizada no município de Itajá/RN, interior do estado do Rio Grande do Norte. O município foi escolhido pois é o local de obtenção e extração da argila vermelha, matéria-prima principal para a produção dos agregados leves. Considerou-se a fábrica localizada em um raio de até 10 km do local da jazida de argila. A argila vermelha do município de Itajá é muito utilizada pelas empresas cerâmicas da região. Conforme estudo realizado por Bezerra (2017), o Polo Ceramista de Itajá é bastante representativo, sendo detentor de 50% das indústrias ceramistas da microrregião do Vale do Açu.

No cenário II, a fábrica está localizada no município de Goianinha/RN, que compõe a região metropolitana de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte. A escolha do município está associada a proximidade de obtenção do RBC, segunda matéria-prima principal para a produção dos agregados leves coletada no município vizinho (Arês/RN). Outro fator relevante é a presença do parque industrial nas vias de acesso da cidade. O município está somando esforços para o desenvolvimento do Polo Industrial Avançado de Goianinha que, segundo Silva, Guerra e Filgueira (2017), trará maior visibilidade e crescimento econômico para a cidade. A distância entre ponto de localização da fábrica e o ponto de coleta do RBC foi considerada dentro de um raio de até 10 km.

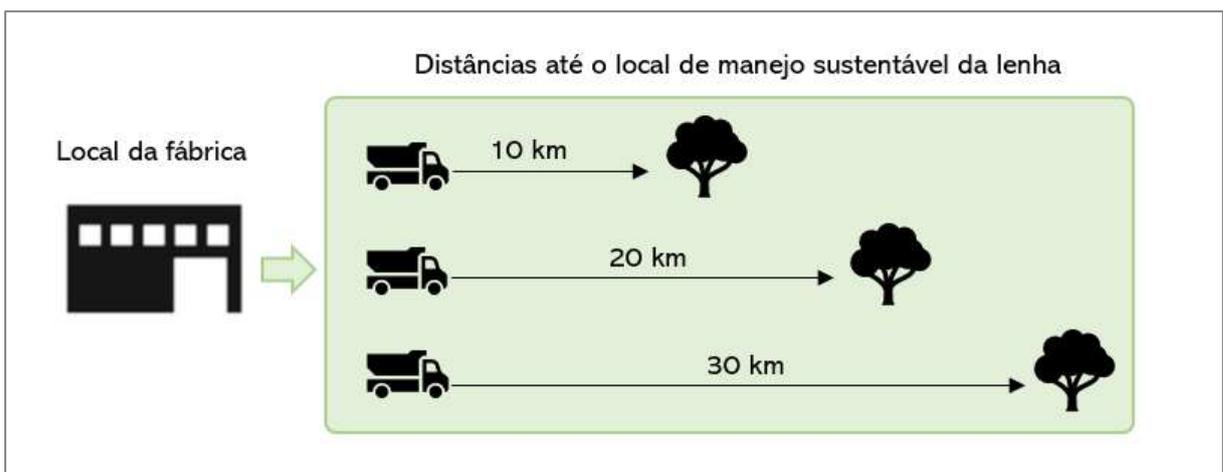
No cenário III, a fábrica está localizada em Parnamirim/RN, município também está localizado na região Metropolitana de Natal. Segundo análise espacial da indústria no estado

do Rio Grande do Norte feita por Azevedo e Galindo (2016), em Parnamirim, a maioria dos estabelecimentos está voltado para a construção civil, contando com 562 serviços especializados para o setor. Portanto, além da proximidade com a capital do estado, Natal, o município representa um grande potencial para centro de distribuidores e consumidores dos agregados leves dentro da região Metropolitana de Natal. A Figura 10 ilustra o mapa do Rio Grande do Norte com a localização dos cenários.

3.2.1 Simulação de locais para a coleta da biomassa de combustível da etapa de queima dos agregados

Os impactos ambientais associados ao transporte da biomassa, utilizada como combustível durante a etapa de queima dos agregados, até o local da fábrica foi realizado separadamente. A verificação das opções para locais de manejo sustentável da lenha em cada cenário de localização da fábrica demandaria um estudo mais detalhado para garantia de resultados mais precisos. Devido a multiplicidade de alternativas de manejo e o tempo necessário para coleta de dados, não foi possível a realização desse estudo. Portanto, foi realizada uma simulação para o transporte da lenha do local de manejo até a fábrica de agregados em diferentes distâncias de transporte. A simulação foi realizada após a indicação do cenário ideal de localização da fábrica ao final do estudo. As distâncias de transporte consideradas nesta simulação foram 10, 20 e 30 quilômetros (Figura 11).

Figura 11 – Simulação dos locais de manejo sustentável da lenha



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.3 Metodologia para a elaboração do modelo de fábrica para agregados leves artificiais

A concepção do modelo de fábrica hipotético para a produção dos agregados leves artificiais foi fundamentada nas etapas produtivas dos agregados leves desenvolvidos por Souza (2019) em escala laboratorial. Para isso, elaborou-se um inventário (ICV) da produção dos agregados leves em laboratório (Apêndice B) para melhor entendimento dos processos associados ao desenvolvimento dos agregados. Com o conhecimento do processo produtivo em escala laboratorial, foi possível ampliar o processo de produção de agregados leves para escala industrial.

As etapas para a elaboração do modelo industrial foram divididas em três, a saber: *i*) determinação da capacidade da fábrica; *ii*) especificação dos equipamentos industriais; *iii*) elaboração do arranjo físico (*layout*) da fábrica. Em primeiro lugar, a determinação da capacidade da fábrica levou em consideração a possibilidade de expansão futura, em caso de aumento do nível de produção dos agregados. Nesta etapa, um fator limitante para a capacidade produtiva da fábrica é a capacidade limite do forno rotativo, equipamento utilizado para a queima dos agregados leves, que possui alto valor econômico. Isso ocorre, pois o processo produtivo é basicamente regido pela produção do forno.

A especificação dos equipamentos foi estabelecida de modo a atender a capacidade inicial e futura pré-estabelecida. A busca de equipamentos industriais teve como base as etapas produtivas, previstas no ICV desenvolvido para a produção dos agregados em escala laboratorial. O levantamento de dados sobre os tipos de equipamentos apropriados para a produção em escala industrial realizou-se mediante consulta diretamente com o fornecedor dos equipamentos, acompanhada pelo sócio proprietário da empresa. O tempo de operação dos equipamentos foi estabelecido a partir da produção (tonelada/hora) especificada pelo fabricante para cada equipamento. O consumo de energia elétrica dos equipamentos foi calculado multiplicando-se a potência do equipamento pelo tempo de operação. Posteriormente, os dados foram tabelados em planilha eletrônica.

O arranjo físico da fábrica levou em consideração uma maior eficiência na produção, com objetivo de evitar o desperdício de transportes de materiais. Diversos tipos de *layout* podem ser utilizados: modelo linear (ou por produto, no qual o produto se movimenta e os equipamentos e postos de trabalho permanecem fixos); modelo funcional (ou por processo, no qual os processos e equipamentos com funções semelhantes são agrupados); modelo posicional (ou fixo, no qual o produto se mantém fixo e as máquinas e postos de trabalho são móveis);

modelo celular (no qual agrupamentos de equipamentos produzem produtos diferentes); ou combinações entre modelos (CORRÊA; CORRÊA, 2013). O tipo de modelo depende do tipo de produto, volume de produção e tecnologia aplicada. O modelo de *layout* considerado foi o modelo linear, por permitir um maior controle e simplicidade da produção. A disposição dos equipamentos levou em consideração o tamanho especificado pelo fornecedor. A partir do *layout* da fábrica, foi possível estabelecer as distâncias de transporte interno.

3.4 Metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV)

A metodologia de ACV é desenvolvida com base nas recomendações das normas brasileiras, que regulamentam a condução dos estudos sobre ACV, a saber:

- NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental: avaliação do ciclo de vida, princípios e estrutura (ABNT, 2009a);
- NBR ISO 14044 – Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida, requisitos e orientações. (ABNT, 2009b).

O procedimento propõe a divisão da pesquisa em quatro fases: definição de objetivo e escopo; análise de inventário do ciclo de vida (ICV); avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV); e, interpretação. Este item compõe os objetivos e escopo da ACV desenvolvida, compreendendo a unidade funcional, fronteira do sistema, tipos de dados, método de análise de impactos e o software de apoio a ACV. Além disso, aqui estão descritos a metodologia contemplada na análise de inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e a interpretação da ACV.

3.4.1 Objetivo da ACV

O objetivo principal deste estudo é avaliar os impactos ambientais de agregados leves produzidos com uso de matérias-primas locais, argila vermelha (ARG-V) e resíduo do bagaço da cana-de-açúcar (RBC). A razão do estudo é identificar e compreender os problemas ambientais da produção em escala industrial sobre o ciclo de vida dos agregados leves produzidos com matérias-primas locais, a fim de analisar os pontos fracos dos produtos e estabelecer melhorias ao modelo industrial proposto.

Além disso, pretende-se estabelecer comparações entre o desempenho ambiental dos agregados leves para três composições, referidas por ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%. Neste estudo, o público alvo corresponde a comunidades acadêmicas, poder público, setores da indústria envolvidos direta ou indiretamente e demais interessados na verificação dos impactos ambientais das matérias-primas utilizadas na construção civil através de técnicas de avaliação, como ACV.

3.4.2 Escopo da ACV

O escopo da ACV foi estabelecido segundo os padrões das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). O escopo da ACV englobou os subitens a seguir: sistema de produto, função do sistema, unidade funcional, fronteira do sistema, procedimentos de alocação, metodologia AICV e categorias de impacto, requisitos de dados, pressupostos, limitações e análise crítica.

3.4.2.1 *Sistema de produto*

O sistema de produto está focado na produção dos agregados leves a partir do resíduo industrial (RBC) e argila vermelha local. Os processos considerados na produção dos agregados leves foram a extração da argila vermelha local, obtenção do resíduo RBC a partir da indústria sucroalcooleira, o transporte das matérias-primas (RBC e argila vermelha) até o local da produção, beneficiamento das matérias-primas e o processo produtivo para a obtenção dos agregados leves.

3.4.2.2 *Função do sistema de produto*

A função do produto está voltada principalmente para a produção de concretos leves na construção civil. Entretanto, existem outras aplicações voltadas para os agregados leves, tais como uso no paisagismo, drenagens, isolamento térmico e acústico.

3.4.2.3 *Unidade funcional*

A unidade funcional será expressa pela produção completa de 1 tonelada de agregado leve preparado com matérias-primas locais (RBC e argila vermelha) em escala industrial em três composições (ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%). Essa unidade funcional foi considerada a mais adequada para a compilação do inventário em processos elementares referentes a produção de agregados (MARTINEZ-ARGUELLEZ *et al.*, 2019; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2018; ROSADO *et al.*, 2017; ESTANQUEIRO *et al.*, 2016; HOSSAIN *et al.*, 2016; FALESCHINI *et al.*, 2016).

3.4.2.4 *Fronteira do sistema*

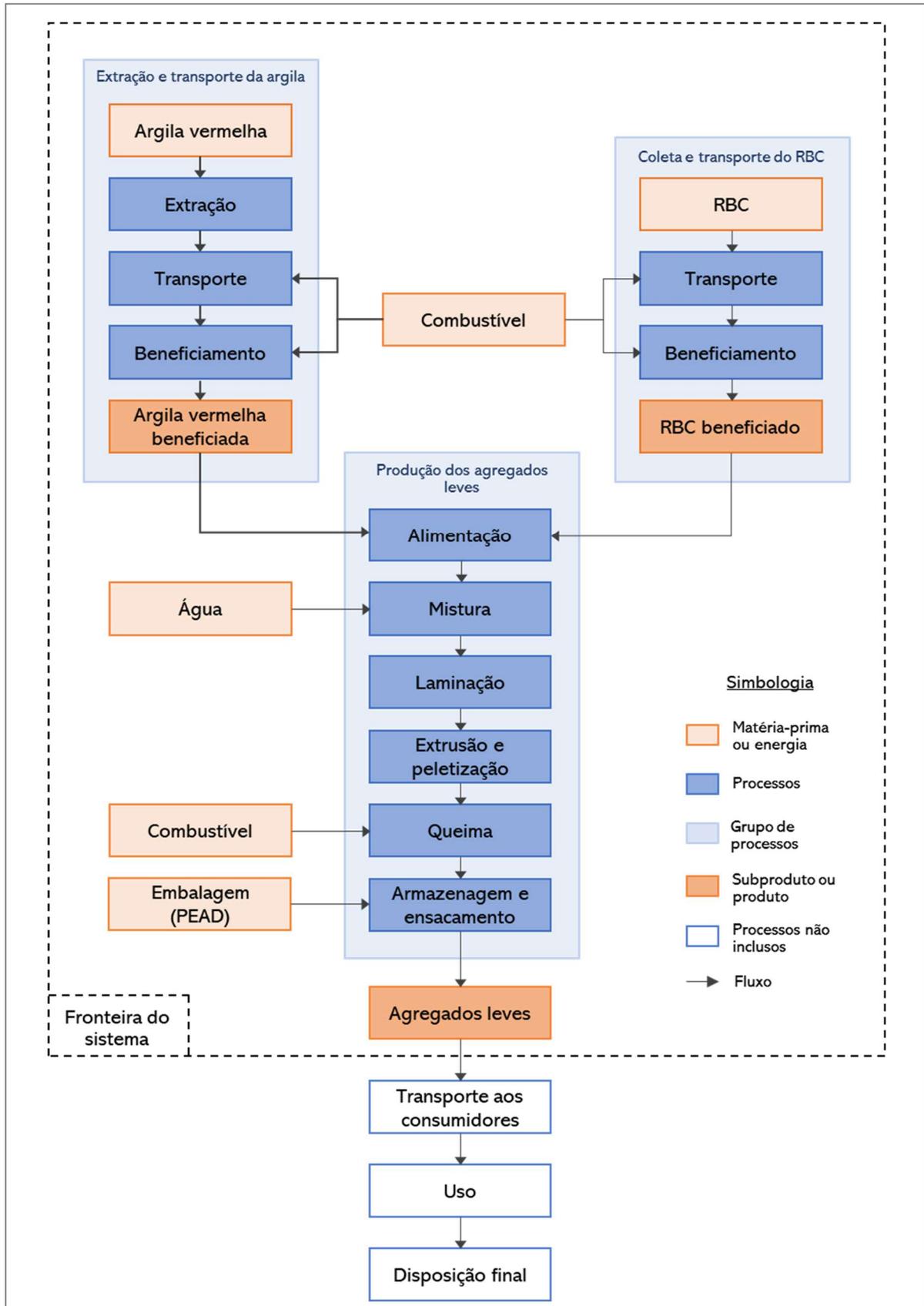
A fronteira do sistema será do berço ao portão (*cradle-to-gate*), onde serão considerados a extração da argila vermelha, transporte e beneficiamento das matérias-primas e a produção do agregado leve em escala industrial. A fronteira se encerra com o agregado leve produzido e pronto para o transporte. A Figura 12 representa a fronteira do sistema indicada pela linha tracejada.

A fronteira geográfica é considerada regional, contemplando os locais de obtenção das matérias-primas, o que equivale a cobertura geográfica na qual os dados foram coletados para satisfazer os objetivos do estudo. A fronteira tecnológica compreende a tecnologia do modelo industrial proposto para a fabricação dos agregados. A fronteira temporal foi adotada, a princípio, por um período de 10 anos, uma vez que foi considerado que não haverá mudanças significativas na tecnologia de produção de agregados leves neste período.

3.4.2.5 *Procedimentos de alocação*

Neste estudo, não foram realizados procedimentos de alocação, visto que o modelo industrial proposto é voltado apenas para a produção de agregados leves; logo todos os impactos ambientais foram atribuídos ao produto principal.

Figura 12 – Fronteira do sistema



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.4.2.6 Metodologia de AICV e tipos de impactos

Neste estudo, foi adotada a modelagem atribucional, modelagem descritiva que indica os impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida de um produto, utilizando dados mensuráveis e históricos. Não foram considerados os efeitos decorrentes de alterações mercadológicas. O *software* OpenLCA versão 1.10 foi utilizado como ferramenta de apoio à modelagem e avaliação de impactos. O método de avaliação utilizado foi o CML 2001 *non baseline*, método aplicável ao software utilizado. Esse método também tem sido utilizado por estudos recentes em materiais cimentícios em geral, tais como concretos e argamassas (MOHAMMADI; SOUTH, 2017), bem como em pesquisas com novos materiais de construção com uso de resíduos (DI MARIA *et al.*, 2018) e na gestão de resíduos na construção (BIZCOCHO; LLATAS, 2019).

As categorias de impactos foram selecionadas em consonância com as diretrizes previstas no manual ILCD (*International Reference Life Cycle Data*) do *Institute for Environment and Sustainability* (EUROPEAN COMMISSION, 2010) de acordo com a disponibilidade de categorias presente no software. As categorias de impacto selecionadas e disponíveis no software foram: potencial de acidificação, eutrofização, aquecimento global, toxicidade humana, depleção da camada de ozônio, formação de ozônio fotoquímico, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha. As análises de ponto médio (ou abordagem *midpoint*) propõem um número maior de categorias e os resultados são mais precisos, além disso permitem uma comparação mais fácil entre os cenários.

3.4.2.7 Requisitos de dados

Os dados utilizados no inventário do ciclo de vida (ICV) foram dados primários e secundários. Os dados primários sobre a extração da argila foram coletados através de questionário (Apêndice A) aplicado à empresa cerâmica acompanhadas pelo diretor e gerente. O questionário foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa do Hospital Universitário Onofre Lopes (CEP/HUOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) para a análise e aprovação (Anexo A). A Resolução 466/12 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) estabelece que pesquisas envolvendo seres humanos requerem a aprovação no conselho de ética (BRASIL, 2013).

Os dados primários sobre as especificações dos equipamentos industriais foram obtidos mediante consulta a empresa fornecedora dos equipamentos, acompanhadas pelo diretor. A prioridade foi dada aos dados primários coletados nas empresas. Em relação ao modelo industrial proposto pelo trabalho, não foi possível realizar a coleta de dados primários de emissões poluentes dos equipamentos industriais. Portanto, dados secundários foram utilizados para o quantitativo de emissões atmosféricas. Para a coleta dos dados secundários, priorizou-se dados de relatórios nacionais, conforme prescrito na descrição do inventário do ciclo de vida.

3.4.2.8 *Pressupostos*

Este estudo avaliou os impactos ambientais da produção de agregados leves em escala industrial, considerando as seguintes fases: *i)* extração e coleta das matérias-primas; *ii)* beneficiamento das matérias-primas e *iii)* produção dos agregados leves.

i) Extração e coleta das matérias-primas: as duas matérias-primas principais são a argila e o resíduo do bagaço da cana-de-açúcar (RBC). A argila é extraída em jazidas localizadas no município de Itajá/RN com auxílio de máquina escavadeira. Após a extração a argila, é transportada em caminhões basculantes até o local fábrica de agregados leves, onde será descarregada nas baias de estocagem. O RBC é obtido na Usina Estivas (indústria de álcool e açúcar), localizada no município de Arês/RN. O resíduo é descarregado diretamente no caminhão basculante, que fará o transporte até o local da fábrica.

ii) Beneficiamento das matérias-primas: a argila e o RBC serão dispostos em pátios separados para secagem ao ar. Em seguida, as matérias-primas irão para o processo de moagem. Após o processo, a argila e o RBC moídos serão dispostos em locais separados, para utilização nas etapas de produção dos agregados leves.

iii) Produção dos agregados leves: o processo produtivo dos agregados leves contemplou as seguintes etapas: alimentação, mistura, laminação, extrusão, peletização, queima, armazenagem e embalagem. Entre as etapas, o transporte dos subprodutos foi realizado por correias transportadoras. As etapas estão detalhadas no item 4.2 onde é apresentado o modelo industrial para a produção dos agregados leves.

3.4.2.9 Limitações do estudo

As principais limitações do estudo estão associadas à tecnologia industrial proposta para a produção dos agregados leves e ao uso de dados secundários relativo as emissões atmosféricas. Os agregados leves utilizados nesta pesquisa são produzidos com argila e RBC em três composições definidas (ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%), não englobando resíduos de outras categorias ou composições diferentes da especificada. A abordagem da ACV utilizada está focada na sustentabilidade do processo de fabricação dos agregados leves, não considerando a abordagem ACV social, nem os custos associados.

Não foram computadas as emissões decorrentes do transporte da embalagem (polietileno), pois isso requer uma análise mais detalhada do local de obtenção desses materiais em cada cenário de localização.

3.4.3 Análise do inventário do ciclo de vida

Uma vez que foi estabelecido o objetivo e escopo da ACV, iniciou-se a etapa de análise do inventário do ciclo de vida. Essa fase foi organizada de acordo com os seguintes procedimentos (ABNT, 2009a):

- a) Preparação para a coleta de dados;
- b) Coleta de dados;
- c) Validação dos dados;
- d) Correlação aos processos elementares e a unidade funcional;
- e) Agregação dos dados;
- f) Refinamento dos limites do sistema;

A preparação para a coleta de dados foi fundamentada pela revisão bibliográfica onde se estabeleceu os principais processos elementares a serem quantificados na produção dos agregados leves. Para cada processo elementar foram quantificadas as entradas e saídas vinculando-os à unidade funcional. Além dos fluxogramas, foram elaborados questionários para auxiliar a coleta de dados.

A coleta de dados sobre argila vermelha, quanto à extração e transporte, foi realizada com auxílio do questionário (Apêndice A) aplicado junto à empresa cerâmica, que auxiliou no fornecimento da argila vermelha ao grupo de pesquisa. Inicialmente, o objetivo do estudo era comparar os resultados dos agregados leves com a argila expandida produzida por uma indústria

brasileira. Entretanto, após o contato e aplicação do questionário referente ao seu processo industrial, a empresa produtora de argila expandida não pôde fornecer os dados, pois se tratava de informações sigilosas, as quais não poderiam disponibilizar. Isso resultou em novas alterações na condução da pesquisa, resultando em um refinamento nos limites do estudo. Portanto, o questionário presente ao final deste estudo limitou-se à coleta das informações relacionadas à extração da argila vermelha (berço).

Os dados referentes aos demais processos elementares foram calculados de acordo com as características do processo produtivo dos agregados leves desenvolvido em laboratório por Souza (2019). Foram considerados os dados referentes às etapas da produção, tipos de equipamentos usados em laboratório, umidade das misturas e perdas de massa nos processos. Após a coleta dos dados do processo de produção em escala laboratorial, optou-se pela busca dos equipamentos industriais para a ampliação do processo para escala industrial.

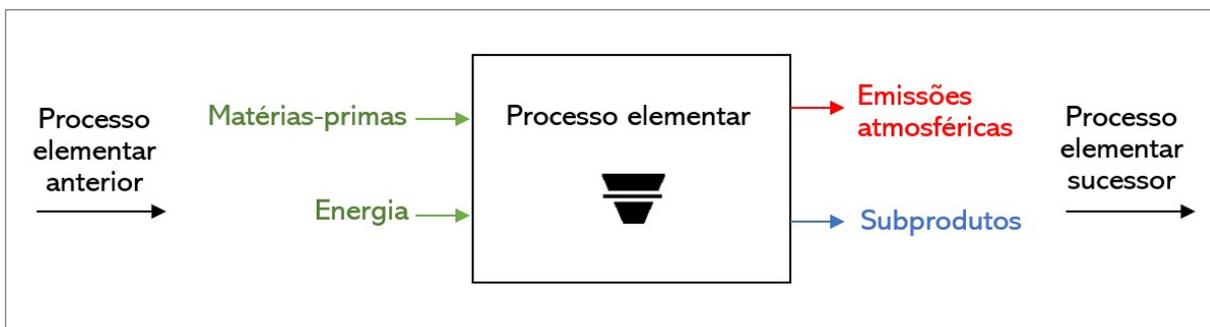
A classificação dos dados foi estabelecida conforme orientação da NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), em: *i*) entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares e outras entradas físicas; *ii*) produtos, coprodutos e resíduos; *iii*) liberações para a atmosfera, água e solo; *iv*) outros aspectos ambientais.

A agregação dos dados foi realizada através do somatório das entradas e saídas de cada processo elementar, com o cuidado para a agregação apenas de substâncias equivalentes. Os dados foram agregados com auxílio de planilha eletrônica. Posteriormente, foram elaborados gráficos para a comparação dos resultados do inventário.

3.4.3.1 *Diagrama de fluxo de vida dos processos elementares*

Para auxiliar no entendimento, foi elaborado um Diagrama de Fluxo de Vida (DFV) para cada processo elementar. O DFV é uma representação visual dos fluxos de entrada e saída de cada processo elementar. Ele auxilia a quantificação dos dados de cada fluxo de acordo com a unidade funcional (OLIVEIRA; MAHLER, 2018). O DFV pode ser construído ao especificar para cada processo elementar, as entradas, saídas, subproduto, processo elementar predecessor e o processo elementar sucessor. Neste estudo, para cada processo elementar foi realizado um DFV, conforme a Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de Fluxo de Vida (DFV)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.4.3.2 Dados secundários

Dados secundários foram obtidos para estimar as emissões atmosféricas nos processos elementares e a quantidade de polietileno presente na embalagem do produto na etapa de ensacamento. Para isso, foram priorizados relatórios nacionais como fontes de dados secundários.

- a) Emissões atmosféricas de veículos: as emissões atmosféricas relacionadas ao transporte de materiais por escavadeira, caminhão basculante e pá carregadeira foram estimadas pelos dados do 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários (BRASIL, 2011). As emissões da combustão consideradas foram: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado ($\text{MP}_{2,5}$) e hidrocarbonetos não metano (NMHC). As emissões de metano (CH_4) relacionadas aos veículos do ciclo diesel são consideradas desprezíveis (BRASIL, 2011). As emissões de pré-combustão associadas à produção, refino e distribuição do diesel não foram consideradas.
- b) Emissões da geração da energia elétrica: as emissões de CO_2 referentes à geração da energia elétrica foram estimadas a partir do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2019).
- c) Emissões atmosféricas referente à queima da biomassa de combustível no forno rotativo: as emissões foram estimadas através do estudo técnico realizado pela APNE (Associação Plantas do Nordeste) intitulado “Biomassa para energia no Nordeste:

atualidade e perspectivas” (BRASIL, 2018). O estudo foi desenvolvido por um projeto implementado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), sob a supervisão e coordenação técnica do Ministério do Meio Ambiente.

d) Quantitativo de polietileno presente na embalagem: a estimativa da quantidade de polietileno presente nos sacos foi obtida através do estudo de ACV em argamassas no Nordeste brasileiro realizado por Selhorst, Silva e Nobre (2019).

3.4.4 Avaliação de impactos ambientais de ciclo de vida (AICV)

A etapa de AICV possibilitou a conversão dos resultados da análise do inventário em termos de impactos sobre o meio ambiente. Os efeitos relacionados ao uso de recursos e as emissões geradas ao longo das etapas produtivas dos agregados leves foram agrupados em categorias de impacto ambiental com auxílio do *software* OpenLCA versão 1.10. O *software* é gratuito, desenvolvido pela GreenDelta para o campo da sustentabilidade e pesquisas em ACV (GREENDELTA, 2020). O programa possui código aberto e uma estrutura modular, que permite maior independência e flexibilidade aos usuários (CIROTH, 2007).

Vários estudos científicos em ACV voltados para a sustentabilidade na construção civil utilizaram o OpenLCA como *software* de apoio, tendo como exemplo pesquisas em pavimentação (SANTOS, 2019), cimentos sustentáveis (ROBAYO-SALAZAR; MEJÍA-ARCILA; GUTIÉRREZ, 2017), telhados verdes (MORAU; RABARISON; RAKOTONDRAMIANANA, 2017), cerâmica vermelha (NAZÁRIO, 2019) e muros de contenção (ZASTROW *et al.*, 2017). Neste estudo, para a modelagem do sistema de produto foram utilizados os bancos de dados *Nexus* disponíveis pela desenvolvedora do *software*. O método de avaliação escolhido foi o CML 2001 *non baseline*, disponível no *software*.

3.4.5 Interpretação do ciclo de vida

A interpretação do ciclo de vida conforme indicado na NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) foi desenvolvida em três etapas, a saber: *i*) identificação das questões significativas; *ii*) avaliação; *iii*) conclusões, limitações e recomendações. Na primeira etapa, para auxiliar na identificação das questões significativas, os dados do ICV foram estruturados para cada

processo elementar. Em seguida, a relevância dos dados foi possível através de uma análise de contribuição percentual das entradas e saídas do ICV para cada processo elementar.

A segunda etapa é a etapa de avaliação do estudo, na qual foram realizadas as verificações de completeza, sensibilidade e consistência. A verificação de completeza foi realizada em cada processo elementar para identificar se os dados estão completos e disponíveis. A sensibilidade foi verificada em relação diferença no consumo de óleo diesel na mudança da categoria do caminhão de transporte das matérias-primas. A consistência foi pautada na verificação dos resultados obtidos com o objetivo e escopo da ACV.

Por fim, com base nos resultados obtidos, na terceira etapa foram feitas as conclusões da ACV, bem como esclarecidas as limitações e propostas recomendações ao processo produtivo.

4 MODELO INDUSTRIAL DE PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS

O estudo da ACV da produção dos agregados leves em escala industrial foi precedido pela elaboração de um modelo industrial. Este capítulo tem a finalidade de apresentar os resultados referentes ao modelo de fábrica para a produção de agregados leves. Nele estão especificados os equipamentos industriais e descrição das etapas produtivas.

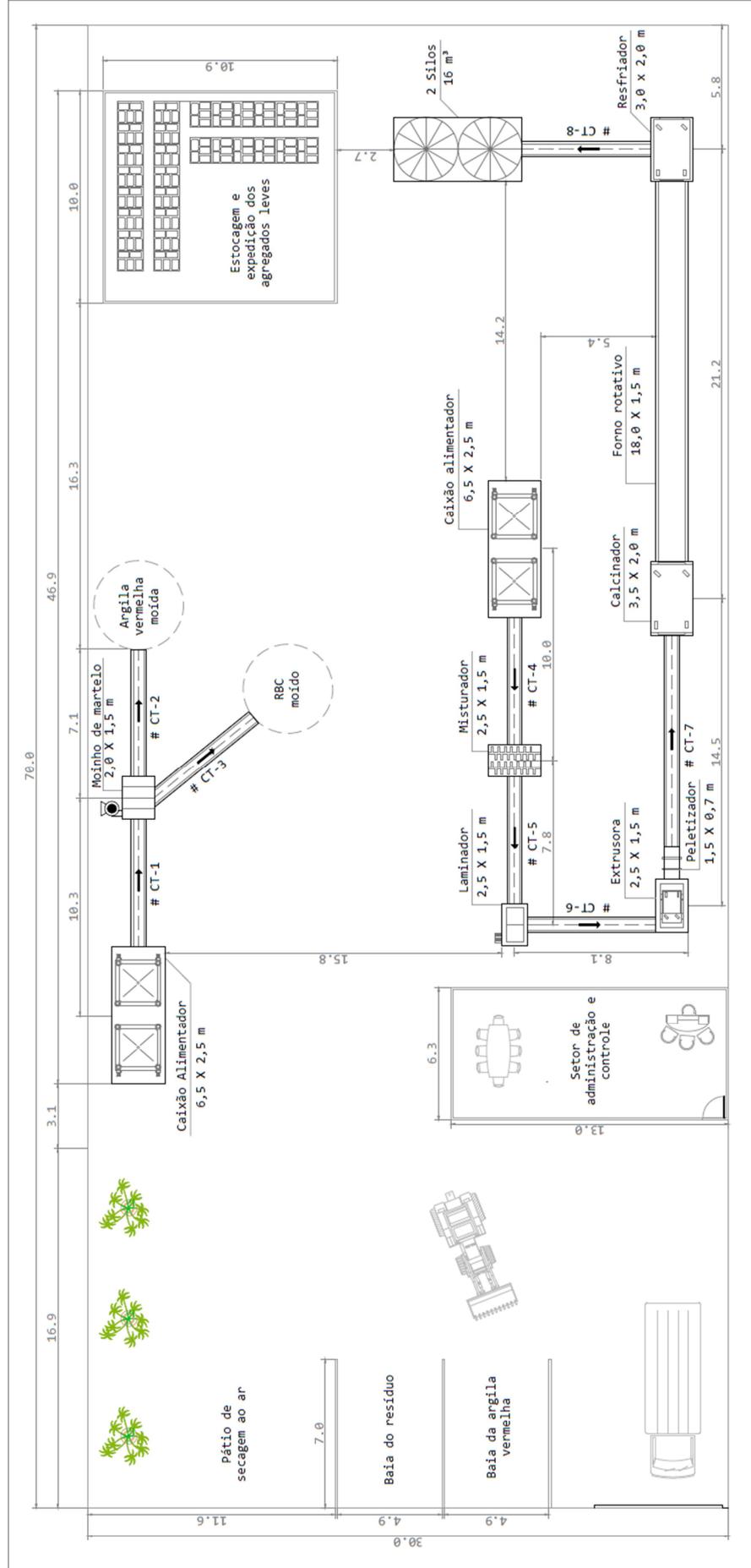
4.1 Descrição geral da fábrica

A capacidade da fábrica inicial contempla a produção diária de 8 toneladas do agregado leve, equivalente a produção horária de 1 tonelada/hora. O regime de trabalho considerado é de 8 horas por dia. A capacidade futura da fábrica pode ser ampliada em até 4 vezes a capacidade inicial, ou seja, as instalações podem produzir até 4 toneladas/hora, o que equivale a produção diária de 32 toneladas do agregado leve, isso em caso de expansão futura.

As instalações da fábrica contemplam os seguintes itens: local (baia) para recebimento das matérias-primas, pátio de secagem, caixão alimentador, moinho de martelo, misturador, laminador, maromba à vácuo, peletizador, calcinador, forno rotativo, resfriador (*cooler*), silos e balança. Além disso, correias transportadoras foram utilizadas para garantir a condução contínua das matérias-primas entre as etapas do processo de produção. O subitem 4.2 deste capítulo contempla a descrição e especificação dos equipamentos previstos para a produção dos agregados leves.

O arranjo físico da fábrica foi realizado de forma a minimizar o transporte das matérias-primas dentro da fábrica. A disposição dos equipamentos em planta foi importante para a determinação das distâncias de transporte interno. Portanto, para a realização da ACV dos agregados leves em escala industrial foi necessário determinar uma planta de fábrica hipotética, que foi prevista inicialmente a partir dos processos em escala laboratorial com expansão para escala industrial. A Figura 14 mostra a planta da fábrica de agregados leves.

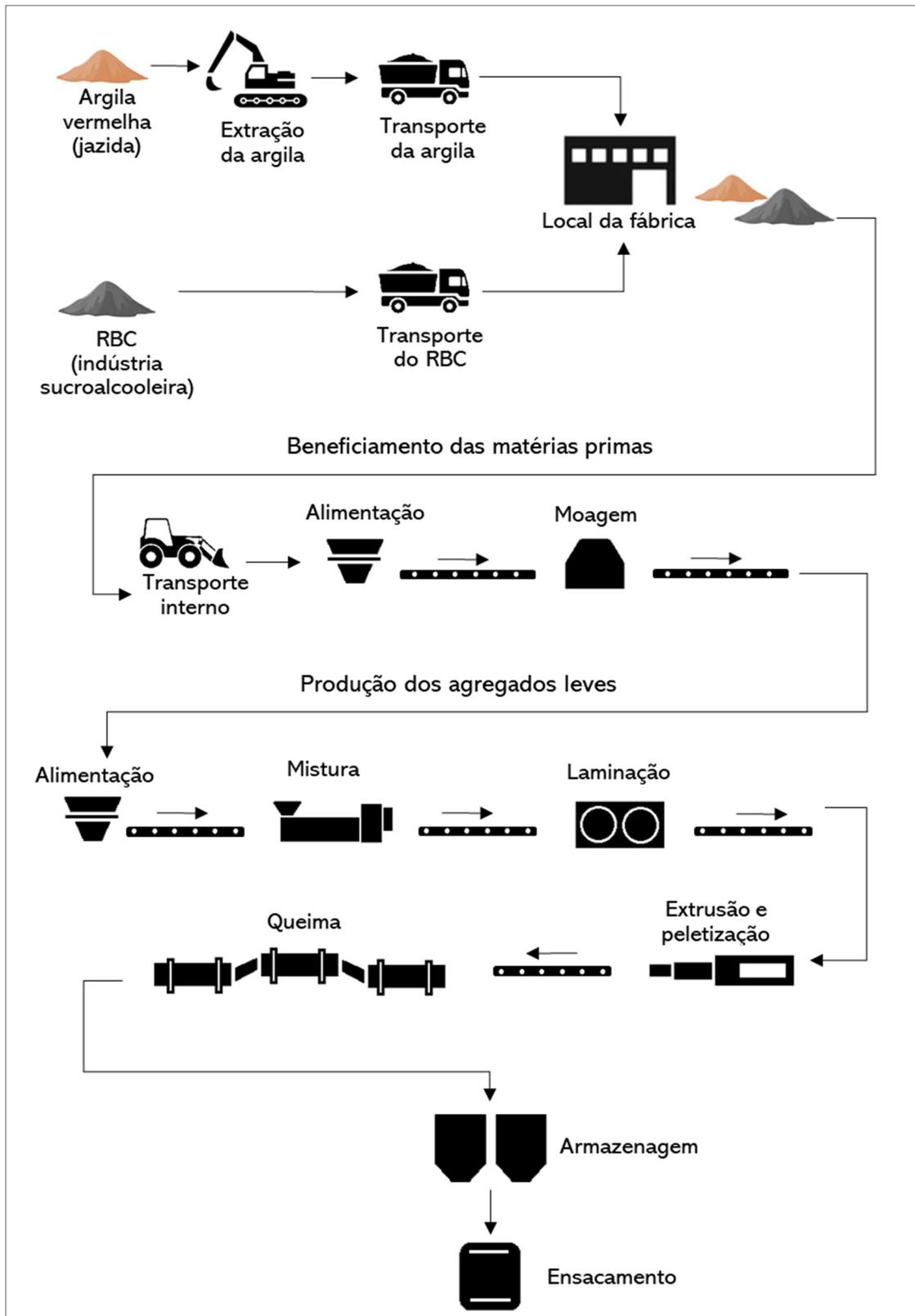
Figura 14 – Planta da fábrica de agregados leves (sem escala)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).
 Legenda: CT – correia transportadora

A Figura 15 mostra o fluxograma das etapas de produção dos agregados leves consideradas no modelo da fábrica.

Figura 15 – Fluxograma das etapas produtivas



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.2 Descrição das etapas produtivas

A produção dos agregados leves consiste em duas fases: beneficiamento das matérias-primas e a produção dos agregados leves propriamente dita. A primeira fase refere-se à preparação das matérias-primas em etapas de secagem ao ar e moagem. A segunda fase trata-se das etapas de produção dos agregados leves, onde contempla: alimentação, mistura, laminação, extrusão, peletização, queima, armazenagem e ensacamento.

4.2.1 Preparação das matérias-primas

As matérias-primas principais para a produção dos agregados leves, argila vermelha e o resíduo do bagaço da cana-de-açúcar (RBC), são descarregadas pelo caminhão basculante em baias separadas. Em seguida, são dispostas com auxílio de uma pá carregadeira em um pátio para secagem ao ar. Após a secagem, os materiais seguem para as unidades de alimentação e moagem.

O alimentador (Figura 16) é o primeiro equipamento no processo de preparação das matérias-primas, possui a função de dosagem das matérias-primas para garantir o carregamento uniforme e constante para a etapa de moagem. O equipamento possui facas rotativas com a finalidade de desfragmentar torrões presentes no material recebido.

Figura 16 – Caixão alimentador



Fonte: Metalúrgica Casa da Cerâmica (2020).

Após passar pelo alimentador, as matérias-primas são encaminhadas por correias transportadoras para a etapa de moagem. Nessa etapa, o equipamento utilizado é o moinho de martelos, que possui a função de reduzir a granulometria dos grãos. O moinho de martelos possui um conjunto de martelos acoplados a cilindros horizontais, que giram no interior do equipamento e impactam as matérias-primas. Após a moagem, as matérias-primas ficam em área protegida (estoque intermediário) para iniciar a entrada na linha de produção.

4.2.2 Alimentação e mistura das matérias-primas

As matérias-primas beneficiadas estão prontas para serem inseridas na linha de produção. Elas são encaminhadas com auxílio de uma pá carregadeira para um caixão alimentador, que possui a finalidade de garantir o abastecimento contínuo da linha de produção. Uma balança com célula de carga pode ser acoplada ao misturador para garantir composições específicas das matérias-primas dos agregados leves.

Após passar pelo alimentador, as matérias-primas são encaminhadas por correias transportadoras para a etapa de mistura. A mistura é realizada por um equipamento misturador (Figura 17). Na própria máquina, é realizada a correção do teor de umidade da mistura. Vale ressaltar a importância da determinação e controle da umidade das matérias-primas após a moagem, para garantir a correção da umidade da mistura adequada a produção dos agregados leves. O misturador possui um sistema de palhetas em aço para realizar a homogeneização do material. Após a mistura, as matérias-primas são encaminhadas por correias transportadoras para a etapa de laminação.

Figura 17 – Misturador



Fonte: Metalúrgica Casa da Cerâmica (2020).

4.2.3 Laminação das matérias-primas

A laminação é uma etapa complementar à mistura. O equipamento utilizado é o laminador (Figura 18), que possui a função de realizar uma melhor distribuição da água presente na mistura, evitando o excesso de água ao redor das partículas. A presença do laminador é importante para evitar ranhuras durante a extrusão da massa úmida. O equipamento possui dois cilindros que giram em rotações opostas, no qual passam o material. Após a laminação, as matérias-primas são encaminhadas por correias transportadoras para a etapa de extrusão e peletização.

Figura 18 – Laminador



Fonte: Metalúrgica Casa da Cerâmica (2020).

4.2.4 Extrusão e peletização

As matérias-primas umedecidas são semelhantes a uma massa pastosa, que será direcionada ao bocal alimentador da maromba extrusora (Figura 19) para dar forma aos agregados leves. O equipamento pressiona o material à boquilha, conformando-o mecanicamente no tamanho e forma desejada do agregado. Em seguida, o equipamento peletizador, que possui um sistema de facas rotativas, realiza o corte em bastões.

Após a peletização, os agregados leves verdes (úmidos) são encaminhados para a etapa de queima. O arredondamento dos bastões é iniciado durante a vibração gerada na correia transportadora e a finalização ocorre no forno rotativo. Entre a etapa de peletização e queima, foi utilizada uma correia transportadora de 10 metros. Ela possui um comprimento maior que as demais para garantir o início da forma arredondada dos agregados leves.

Figura 19 – Extrusora



Fonte: Metalúrgica Casa da Cerâmica (2020).

4.2.5 Queima

O processo de queima é fundamental para a formação da fase vítrea, onde os gases gerados na queima são retidos e provocam a expansão do material (CLARKE, 2002). A queima dos agregados úmidos ocorre a temperaturas altas. Para as três composições em estudo (ARG-V-100%, RBC-50% e RBC-90%), a queima limite chega a atingir 1200°C. Nessa etapa, são usados três tipos de equipamentos: calcinador, forno rotativo e resfriador.

O calcinador prepara a mistura para ser submetida a altas temperaturas, o equipamento funciona como uma rampa de aquecimento do material. Sem a presença do calcinador, seria necessário um forno rotativo de aproximadamente 30 metros, o que elevaria muitos os custos da instalação da fábrica. Em seguida, o material cai diretamente no forno rotativo.

O forno rotativo é um equipamento utilizado para realizar o tratamento térmico dos agregados leves em alta temperatura. O equipamento é composto por um cilindro horizontal rotativo com uma inclinação horizontal para garantir o avanço da carga ao longo do forno. O revestimento interno deve ser de material refratário para garantir a operação em altas temperaturas. O controle de temperatura pode ser realizado por meio de termopares instalados no interior do forno. Diferente dos demais equipamentos, o forno rotativo possui regime de operação contínuo.

A rotação é realizada por meio de motores externos. Na parte interna, a carga acompanha o movimento das paredes do forno até determinada altura e depois cai rolando de forma caótica

sobre a vizinhança (HARTKE, 2007). A Figura 20 mostra o interior do forno rotativo de uma empresa de agregado de argila expandida.

Figura 20 – Saída de agregados leves do interior do forno rotativo

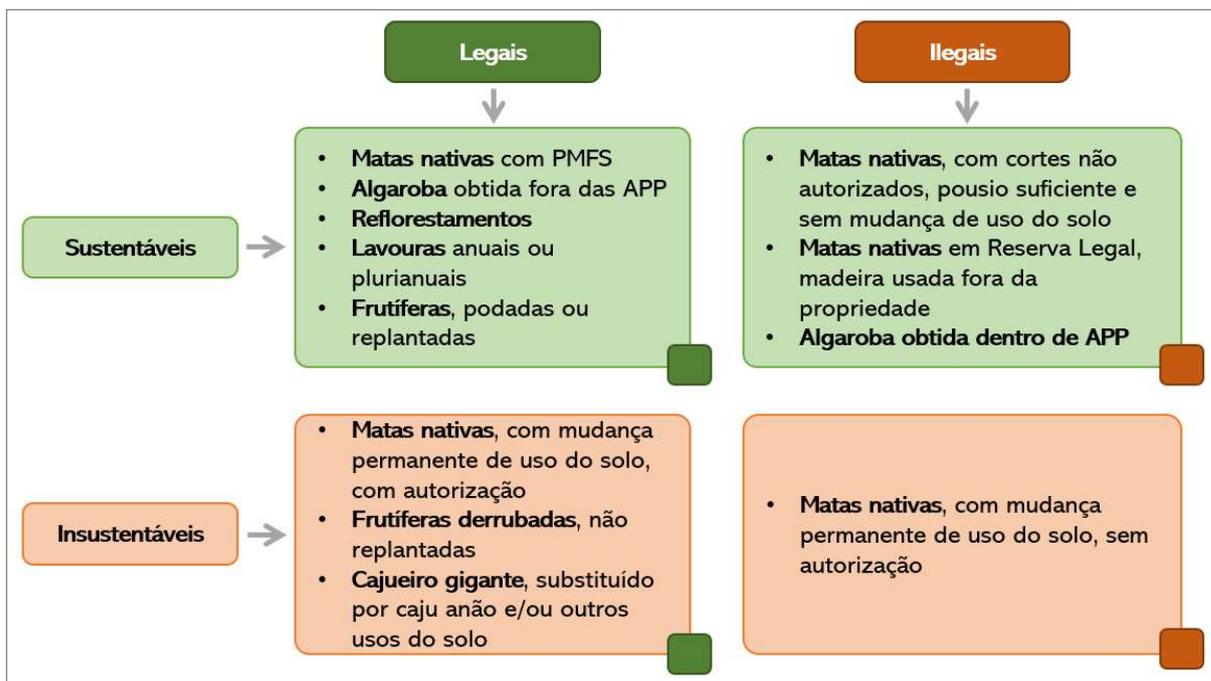


Fonte: Argex (2020).

Foi previsto inicialmente a utilização do gás natural como combustível para o forno rotativo. Entretanto, em consulta ao fornecedor, foi identificado que essa possibilidade não seria viável devido aos custos associados à instalação do gás (bicos, reguladores, entre outros), custos associados ao fornecimento do gás pela concessionária até o local da fábrica e o custo-benefício final dos agregados.

Optou-se, então, pelo uso da biomassa sustentável para o provimento de energia no forno. Biomassa sustentável é “aquela obtida por um sistema de manejo que mantém o estoque de carbono e a produtividade da fonte no longo prazo” (BRASIL, 2018, p. 134). Vale ressaltar que uma mesma fonte pode gerar biomassa de maneira sustentável ou não sustentável, a depender do grau de renovabilidade associada ao seu aproveitamento (Figura 21). O tipo de biomassa escolhido foi a algaroba (*Prosopis juliflora*). Segundo Pereira e Lima (2002), a algaroba é uma das espécies mais plantadas em regiões semiáridas, devido à sua alta produtividade e resistência à seca. A algaroba é considerada uma espécie exótica, seu uso é liberado pelo órgão de fiscalização ambiental estadual, não sendo exigido o Documento de Origem Florestal (DOF) (BEZERRA, 2017).

Figura 21 – Sustentabilidade e legalidade em diferentes fontes de biomassa



Fonte: Adaptado de BRASIL (2018).

Legenda: APP - Área de Preservação Permanente; PMFS - Plano de Manejo Florestal Sustentável.

É possível citar outras vantagens do uso algaroba como fonte de energia sustentável, ou seja, fora das APPs (Áreas de Preservação Permanentes) e áreas de reserva legal, conforme indicado pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2018):

- Sua densidade e tamanho a torna muito adequada para uso energético;
- Possui taxas de crescimento altas, o que permite sistemas de manejo simples e eficazes, com ciclos de corte curtos e diversidade de produtos (lenha, estacas e mourões);
- Seus níveis de emissão direta de CO₂ são considerados muito baixos, diferente dos obtidos para a lenha de cerrado e cajueiro, que são considerados altos.

Outra possibilidade seria o uso da madeira proveniente de podas sustentáveis, como a poda do cajueiro, ou poda sustentável realizada por companhias de energia no meio urbano. Além disso, também pode-se fazer uso de painéis fotovoltaicos. O processo também pode contar com um sistema de reaproveitamento da energia térmica utilizada para aumentar a eficiência da queima do combustível.

Para reduzir ainda mais as emissões de gases poluentes gerados na combustão da biomassa, o sistema de queima conta com um equipamento lavador de gás (Figura 21). O

equipamento é utilizado no controle da poluição reduzindo entre 60-70% das emissões de CO₂, segundo o fornecedor.

Figura 22 – Lavador de gás



Fonte: Metalúrgica Casa da Cerâmica (2020).

Após a queima, os agregados seguem para um resfriador (*cooler*), que tem a função de realizar o arrefecimento adequado do material. Nessa etapa, é possível o aproveitamento da energia térmica residual. Os agregados leves resfriados passam por uma inspeção e seguem para os silos de estocagem.

4.2.6 Armazenamento e embalagem

A estocagem do agregado é realizada através de dois silos de 8 m³ com uma balança acoplada. A partir dos silos, os agregados leves podem ser fornecidos a granel (diretamente em um caminhão), em sacos do tipo *bigbag* ou sacos de 10 kg (geralmente comercializado em lojas de construção locais).

4.3 Especificação dos equipamentos

Os equipamentos industriais foram escolhidos para atender a capacidade máxima da fábrica de 4 toneladas/hora. A especificação dos equipamentos foi realizada mediante consulta ao diretor da empresa fornecedora de equipamentos para indústrias ceramistas. A Tabela 2 indica a especificação e a quantidade de equipamentos para a produção dos agregados leves.

Tabela 2 – Especificação e quantidade dos equipamentos

Equipamento	Tamanho (comprimento x largura x altura)	Potência (hp)	Unidades
Caixão alimentador	6,5 m x 2,5 m x 1,5 m	10	2
Correia transportadora	6,0 m x 0,7 m x 0,5 m	3	7
	10 m x 0,7 m x 0,5 m	3	1
Moinho de martelo	2,0 m x 1,5 m x 1 m	40	1
Misturador de argila	2,5 m x 1,5 m x 0,8 m	20	1
Laminador de argila	2,0 m x 1,2 m x 1,0 m	20	1
Maromba à vácuo	2,5 m x 1,5 m x 1,5 m	50	1
Peletizador	1,5 m x 0,7 m x 1,0 m	5	1
Calcinador	3,5 m x 2,0 m x 1,5 m	7,5	1
Forno rotativo	18 m x 1,5 m x 2,0 m	20	1
Resfriador	3,0 m x 2,0 m x 1,2 m	2,5	1
Lavador de gás	3,0 m x 2,0 m x 5,0 m	10	1
Silo de 8 m ³ e balança	6,0 m x 3,0 m x 3,0 m	5	2

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Alguns equipamentos podem ter taxas diferentes de produção por hora. A continuidade da linha de produção pode ser realizada com auxílio de inversores de frequência para que garantir que os equipamentos funcionem de forma sincronizada.

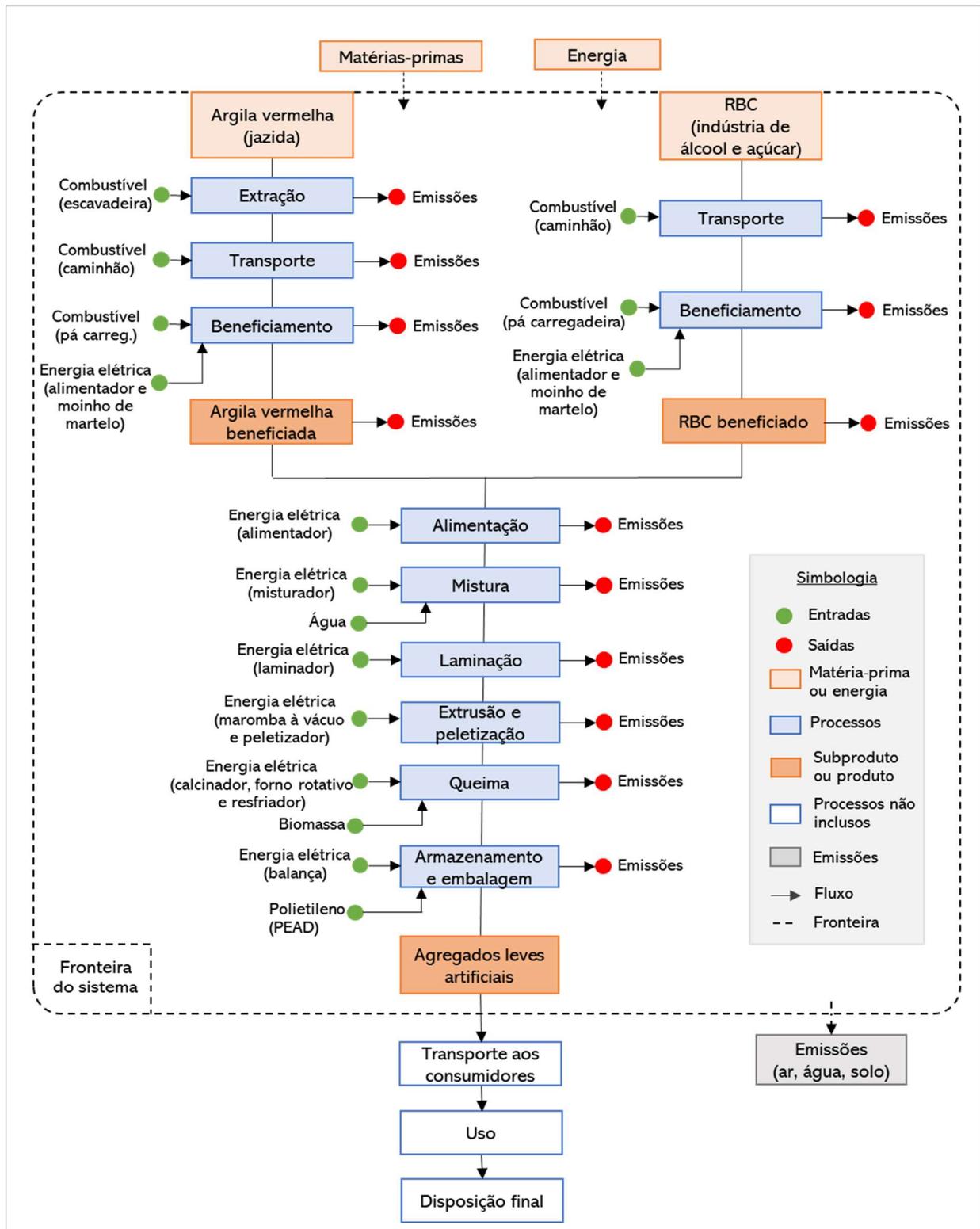
5 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS

Os resultados da análise do inventário do ciclo de vida (ICV) da produção dos agregados leves artificiais incluem a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas do sistema de produto. Cada etapa do processo produtivo foi detalhada em um Diagrama de Fluxo de Vida (DFV), onde foram descritas e quantificadas as entradas (energia, matéria-prima ou subprodutos) e as saídas (emissões ambientais, produtos ou outros subprodutos) correspondentes ao processo elementar referente as três composições do agregado, identificadas em ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%. Pela relevância dos resultados, o ICV detalhado neste capítulo está associado apenas a produção em escala industrial, processo semelhante foi realizado anteriormente para a produção dos agregados leves em escala laboratorial, onde os resultados estão presentes no Apêndice B.

Ao final, os dados foram agregados em nove inventários, visto que para cada uma das três composições do agregado leve foi avaliada a produção em três diferentes locais. Todos os dados estão associados a unidade funcional de 1 tonelada do agregado leve produzido. Posteriormente, os resultados do inventário foram os dados de entrada da avaliação de impacto do ciclo de vida. A Figura 23 representa um panorama geral dos processos e das entradas e saídas consideradas no ICV. Portanto, as etapas consideradas no ICV foram:

- Extração da argila;
- Transporte da argila e do RBC até o local da fábrica;
- Beneficiamento das matérias-primas (alimentação, moagem e transporte por correias transportadoras);
- Alimentação;
- Mistura;
- Laminação;
- Extrusão e peletização;
- Queima;
- Armazenagem e ensacamento.

Figura 23 – Fluxograma das entradas e saídas do ICV



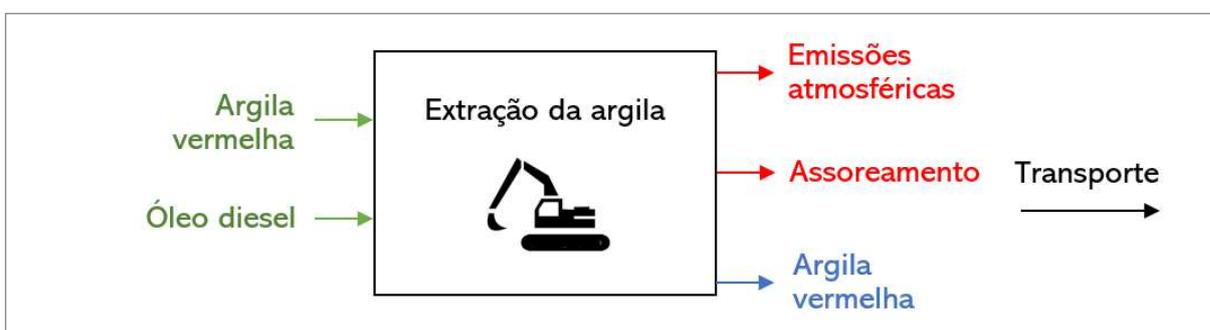
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.1 Processo elementar de extração da argila

A argila é extraída no município de Itajá/RN. A extração é realizada duas vezes por ano nos períodos de seca. O equipamento utilizado para a extração é uma escavadeira hidráulica com capacidade de 15 m³ e potência de 155 hp. A fonte energética utilizada pela escavadeira é o óleo diesel. As informações obtidas para o processo elementar da argila foram coletadas mediante o questionário (Apêndice A) aplicado a empresa cerâmica.

As entradas e saídas do processo de extração da argila estão descritas na Figura 24 e quantificadas na Tabela 3. Destacam-se o uso de recursos naturais, emissões atmosféricas, assoreamento e energia (óleo diesel). O assoreamento não foi possível de ser quantificado. O agregado leve de mistura ARG-V 100% requer maior quantidade da argila na composição, consequentemente, maior uso do recurso natural.

Figura 24 – DFV do processo elementar de extração da argila



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 3 – Quantificação das entradas e saídas do processo de extração da argila

Tipo de fluxo	Fluxo	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Recurso	Argila vermelha	1,134	t	0,620	t	0,145	t
	Energia	Óleo diesel	0,138	L	0,076	L	0,018	L
	Subproduto	Argila vermelha	1,134	t	0,620	t	0,145	t
Saídas	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,370	kg	0,202	kg	0,047	kg
		Monóxido de carbono (CO)	0,970	g	0,530	g	0,124	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,355	g	0,194	g	0,045	g
		Material particulado (MP)	0,344	g	0,188	g	0,044	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	5,586	g	3,055	g	0,714	g

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.2 Processo elementar de transporte da argila até o local da fábrica

O transporte da argila do local de extração até o local da fábrica (transporte externo) é realizado por caminhões caçamba trucados. O veículo possui capacidade de 12 m³ e como fonte energética, o óleo diesel. As distâncias de transporte entre o local da extração e o local da fábrica variam a depender do cenário escolhido, conforme indicado na descrição da metodologia. Desse modo, a quantidade de óleo diesel e as emissões atmosféricas foram contabilizados para os diferentes cenários (Tabela 4).

As entradas e saídas do processo de transporte externo da argila estão descritas na Figura 25. Destacam-se a energia (óleo diesel) e as emissões atmosféricas. O consumo de óleo diesel foi dado em função da quantidade de recurso exigida na etapa em relação a capacidade total de transporte do veículo. No cenário I, o local da fábrica está mais próximo ao local de extração da argila, sendo assim, o consumo de óleo diesel e as emissões geradas apresentaram resultados menores em relação aos demais cenários.

Figura 25 – DFV do processo elementar de transporte da argila



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 4 – Quantificação das entradas e saídas do processo de transporte da argila

Tipo de fluxo	Fluxo	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Recurso Argila vermelha	1,134	t	0,620	t	0,145	t	
	Energia (cenário I) Óleo diesel	0,298	L	0,163	L	0,038	L	
	Energia (cenário II) Óleo diesel	7,064	L	3,863	L	0,903	L	
	Energia (cenário III) Óleo diesel	5,991	L	3,276	L	0,766	L	
Saídas	Subproduto Argila vermelha	1,134	t	0,620	t	0,145	t	
	Emissões (cenário I)	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,796	kg	0,435	kg	0,102	kg
		Monóxido de carbono (CO)	2,088	g	1,142	g	0,267	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,765	g	0,419	g	0,098	g
		Material particulado (MP)	0,742	g	0,406	g	0,095	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	12,028	g	6,578	g	1,538	g
	Emissões (cenário II)	Dióxido de carbono (CO ₂)	18,867	kg	10,318	kg	2,413	kg
		Monóxido de carbono (CO)	49,487	g	27,063	g	6,328	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	18,138	g	9,919	g	2,319	g
		Material particulado (MP)	17,578	g	9,613	g	2,248	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	285,054	g	155,889	g	36,452	g
	Emissões (cenário III)	Dióxido de carbono (CO ₂)	16,002	kg	8,751	kg	2,046	kg
		Monóxido de carbono (CO)	41,970	g	22,952	g	5,367	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	15,383	g	8,412	g	1,967	g
		Material particulado (MP)	14,908	g	8,153	g	1,906	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	241,755	g	132,210	g	30,915	g

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.3 Processo elementar beneficiamento da argila vermelha

O beneficiamento da argila vermelha envolve a etapa de secagem ao ar e moagem. A argila é colocada no pátio de secagem ao ar com auxílio de pá carregadeira. Em seguida, o veículo leva a argila do pátio de secagem para o caixão alimentador, onde será realizada a dosagem para a etapa de moagem. O transporte, entre o caixão alimentador e o moinho de martelo, é realizado por uma correia transportadora. Após a moagem, a argila é direcionada ao local de estoque intermediário.

A pá carregadeira utiliza o óleo diesel como fonte energética, enquanto o caixão alimentador, o moinho de martelo e as correias transportadoras utilizam a energia elétrica. Segundo o fornecedor, as perdas de material dentro dos equipamentos e no transporte pelas correias transportadoras são insignificantes. As distâncias de transporte foram obtidas através do arranjo físico da fábrica. Da mesma forma que o transporte externo, o consumo de óleo diesel foi dado em função da quantidade de recurso exigida na etapa em relação a capacidade total de transporte do veículo.

As etapas do beneficiamento (alimentação, moagem e transporte) foram agregadas em um único processo elementar, visto que a quantidade de energia elétrica e os poluentes gerados em cada etapa individualmente possuíam valores muito pequenos em relação às demais etapas do processo de produção. Desse modo, foi elaborado um DFV de todo o processo de beneficiamento da argila (Figura 26).

Figura 26 – DFV do processo elementar de beneficiamento da argila



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Na Tabela 5 encontra-se a quantificação das entradas e saídas do beneficiamento da argila.

Tabela 5 - Quantificação das entradas e saídas do processo de beneficiamento da argila

Tipo de fluxo	Fluxo	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Subproduto	Argila vermelha	1,134	t	0,620	t	0,145	t
	Energia	Óleo diesel	0,011	L	0,006	L	0,001	L
		Energia elétrica	11,905	kWh	6,510	kWh	1,522	kWh
Saídas	Subproduto	Argila vermelha	1,134	t	0,620	t	0,145	t
	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	1,076	kg	0,589	kg	0,138	kg
		Monóxido de carbono (CO)	0,075	g	0,041	g	0,010	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,028	g	0,015	g	0,004	g
		Material particulado (MP)	0,027	g	0,015	g	0,003	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,433	g	0,237	g	0,055	g

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.4 Processo elementar de transporte do RBC até o local da fábrica

O RBC proveniente da indústria de álcool e açúcar é descarregado diretamente no caminhão basculante. O veículo possui capacidade de 12 m³ e utiliza o óleo diesel como fonte energética. As entradas e saídas do processo de transporte externo do RBC (Figura 27) estão quantificadas na Tabela 6.

Figura 27 – DFV do processo elementar de transporte do RBC



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O agregado leve de composição ARG-V 100% não possui o RBC na mistura, logo, neste processo elementar as quantidades estão zeradas. O local de obtenção do RBC está mais próximo ao local da fábrica do cenário II. Portanto, o consumo de óleo diesel e as emissões atmosféricas apresentaram resultados menores. Não foi possível prever as perdas de material durante o transporte do RBC pelo caminhão basculante.

Tabela 6 - Quantificação das entradas e saídas do processo de transporte do RBC

Tipo de fluxo	Fluxo	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Recurso RBC	0,00	t	0,620	t	1,305	t	
	Energia (cenário I) Óleo diesel	0,00	L	3,912	L	8,233	L	
	Energia (cenário II) Óleo diesel	0,00	L	0,163	L	0,343	L	
	Energia (cenário III) Óleo diesel	0,00	L	0,652	L	1,372	L	
Saídas	Subproduto RBC	0,00	t	0,620	t	1,305	t	
	Emissões (cenário I)	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,00	kg	10,449	kg	21,989	kg
		Monóxido de carbono (CO)	0,00	g	27,406	g	57,675	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,00	g	10,045	g	21,139	g
		Material particulado (MP)	0,00	g	9,735	g	20,486	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,00	g	157,862	g	332,220	g
	Emissões (cenário II)	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,00	kg	0,435	kg	0,916	kg
		Monóxido de carbono (CO)	0,00	g	1,142	g	2,403	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,00	g	0,419	g	0,881	g
		Material particulado (MP)	0,00	g	0,406	g	0,854	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,00	g	6,578	g	13,842	g
	Emissões (cenário III)	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,00	kg	1,741	kg	3,665	kg
		Monóxido de carbono (CO)	0,00	g	4,568	g	9,613	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,00	g	1,674	g	3,523	g
		Material particulado (MP)	0,00	g	1,622	g	3,414	g
Hidrocarbonetos não metano (NMHC)		0,00	g	26,310	g	55,370	g	

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.5 Processo elementar de beneficiamento do RBC

O processo de beneficiamento do RBC possui as mesmas etapas consideradas no processo de beneficiamento da argila. Sendo assim, o procedimento de cálculo é equivalente. O RBC é levado para o pátio de secagem por uma pá carregadeira. Após determinado tempo, o RBC é direcionado ao caixão alimentador, em seguida é levado por correias transportadoras ao moinho de martelo.

A pá carregadeira é movida a óleo diesel e os demais equipamentos (caixão alimentador, moinho de martelo e correias transportadoras) utilizam a energia elétrica. A Figura 28 mostra o DFV do processo de beneficiamento do RBC. A quantificação das entradas e saídas do processo encontra-se na Tabela 7.

Figura 28 – DFV do processo elementar de beneficiamento do RBC



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 7 - Quantificação das entradas e saídas do processo de beneficiamento do RBC

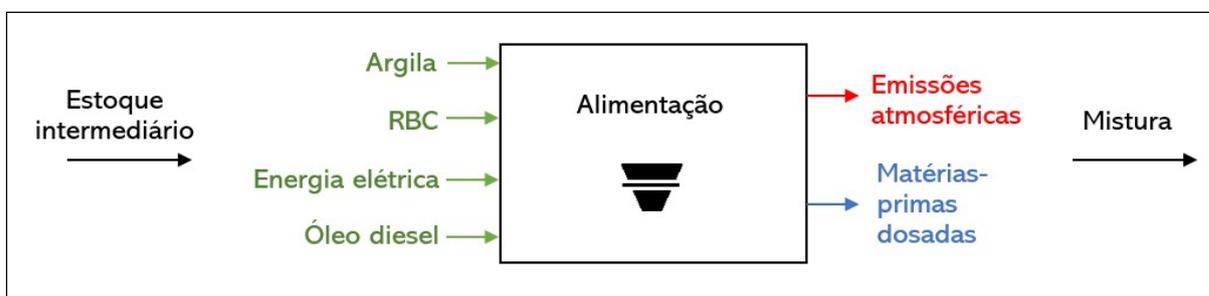
Tipo de fluxo	Fluxo	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Subproduto	RBC	0,00	t	0,620	t	1,305	t
	Energia	Óleo diesel	0,00	L	0,006	L	0,012	L
		Energia elétrica	0,00	kWh	6,510	kWh	13,701	kWh
Saídas	Subproduto	RBC	0,00	t	0,620	t	1,305	t
	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,00	kg	0,589	kg	1,239	kg
		Monóxido de carbono (CO)	0,00	g	0,041	g	0,087	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,00	g	0,015	g	0,032	g
		Material particulado (MP)	0,00	g	0,015	g	0,031	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,00	g	0,237	g	0,498	g

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.6 Processo elementar de alimentação das matérias-primas

A argila e o RBC beneficiados são levados do estoque intermediário até o caixão alimentador com auxílio de uma pá carregadeira. O caixão alimentador fará a dosagem das matérias-primas para a produção dos agregados leves. Logo após, as matérias-primas são carregadas por correias transportadoras até a etapa de mistura. A pá carregadeira utiliza o óleo diesel como fonte de energia. O caixão alimentador e as correias transportadoras utilizam como fonte a energia elétrica. As entradas e saídas estão destacadas na Figura 29 e Tabela 8 a seguir.

Figura 29 – DFV do processo elementar de alimentação



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 8 - Quantificação das entradas e saídas do processo de alimentação

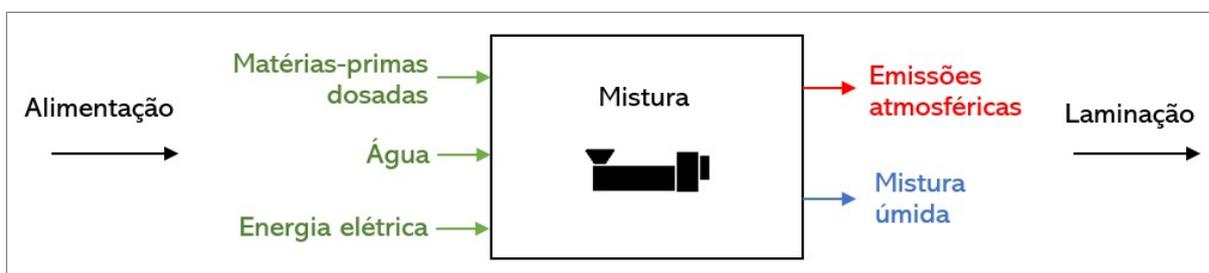
Tipo de fluxo	Descrição	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Subprodutos	RBC beneficiado	0,00	t	0,620	t	1,305	t
		Argila vermelha beneficiada	1,134	t	0,620	t	0,145	t
	Energia	Óleo diesel	0,009	L	0,010	L	0,012	L
		Energia elétrica	2,764	kWh	3,023	kWh	3,534	kWh
Saídas	Subproduto	Matérias-primas dosadas	1,134	t	1,240	t	1,450	t
	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,268	kg	0,293	kg	0,343	kg
		Monóxido de carbono (CO)	0,065	g	0,071	g	0,083	g
		Óxidos de nitrogênio (NO _x)	0,024	g	0,026	g	0,031	g
		Material particulado (MP)	0,023	g	0,025	g	0,030	g
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,375	g	0,410	g	0,480	g

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.7 Processo elementar de mistura

No processo de mistura, as matérias-primas dosadas na etapa anterior são umedecidas até atingir a plasticidade ideal da mistura. A etapa é realizada no misturador com uso de energia elétrica. As entradas são as matérias-primas dosadas, água e energia elétrica. O resultado do processo é uma mistura úmida que seguirá para a laminação através de correias transportadoras. O DFV do processo de mistura encontra-se na Figura 30. As entradas e saídas estão quantificadas na Tabela 9.

Figura 30 – DFV do processo elementar de mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 9 - Quantificação das entradas e saídas do processo de mistura

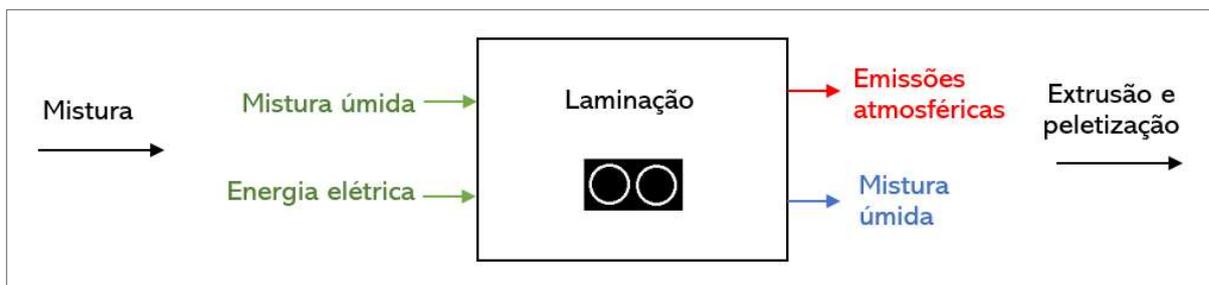
Tipo de fluxo	Descrição	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Recurso	Água	0,454	m ³	0,546	m ³	0,681	m ³
	Subproduto	Matérias-primas dosadas	1,134	t	1,240	t	1,450	t
	Energia	Energia elétrica	6,845	kWh	7,701	kWh	9,191	kWh
Saídas	Subproduto	Mistura úmida	1,587	t	1,786	t	2,131	t
	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,602	kg	0,678	kg	0,809	kg

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.8 Processo elementar de laminação

A laminação melhora a distribuição da água na mistura, evitando o excesso de flocos de água nas partículas. O equipamento utilizado é o laminador e a fonte de energia é a energia elétrica. Após a laminação, a mistura úmida é direcionada para a etapa de extrusão e peletização por correias transportadoras. O DFV do processo de laminação encontra-se na Figura 31. As entradas e saídas estão quantificadas na Tabela 10.

Figura 31 – DFV do processo elementar de laminação



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 10 - Quantificação das entradas e saídas da laminação

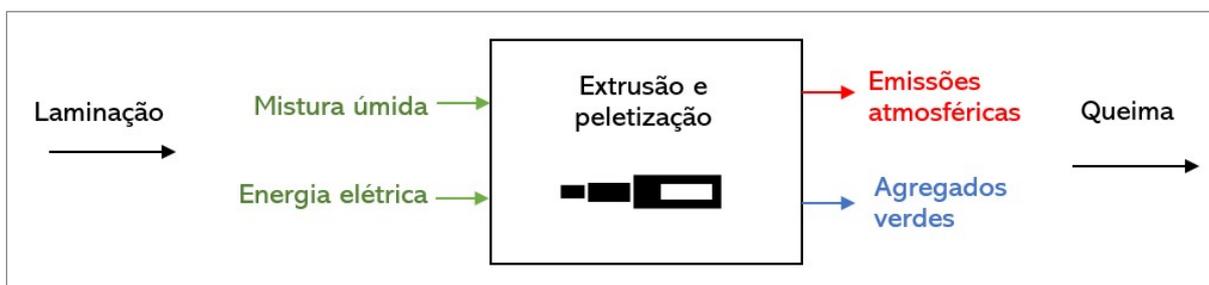
Tipo de fluxo	Descrição	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%	
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.
Entradas	Subproduto Mistura úmida	1,587	t	1,786	t	2,131	t
	Energia Energia elétrica	6,845	kWh	7,701	kWh	9,191	kWh
Saídas	Subproduto Mistura úmida	1,587	t	1,786	t	2,131	t
	Emissões Dióxido de carbono (CO ₂)	0,602	kg	0,678	kg	0,809	kg

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.9 Processo elementar de extrusão e peletização

A massa úmida, após a laminação, é compactada em uma maromba extrusora à vácuo e, em seguida, um peletizador realiza o corte em bastões, dando forma aos agregados leves. A fonte de energia da extrusora e peletizador é a energia elétrica. O transporte dos agregados verdes entre a etapa de peletização e a queima é realizado por uma correia transportadora de 10 metros. Ela possui uma extensão maior do que as demais correias, para dar início ao arredondamento dos grãos, que, posteriormente, será finalizado no forno rotativo. As entradas e saídas do processo de extrusão e peletização estão descritas na Figura 32 e a sua quantificação na Tabela 11.

Figura 32 – DFV do processo elementar de extrusão e peletização



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 11 – Quantificação das entradas e saídas do processo de extrusão e peletização

Tipo de fluxo	Descrição	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Subproduto	Mistura úmida	1,587	t	1,786	t	2,131	t
	Energia	Energia elétrica	17,857	kWh	20,089	kWh	23,977	kWh
Saídas	Subproduto	Agregados verdes (úmidos)	1,587	t	1,786	t	2,131	t
	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	1,571	kg	1,768	kg	2,110	kg

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.10 Processo elementar de queima

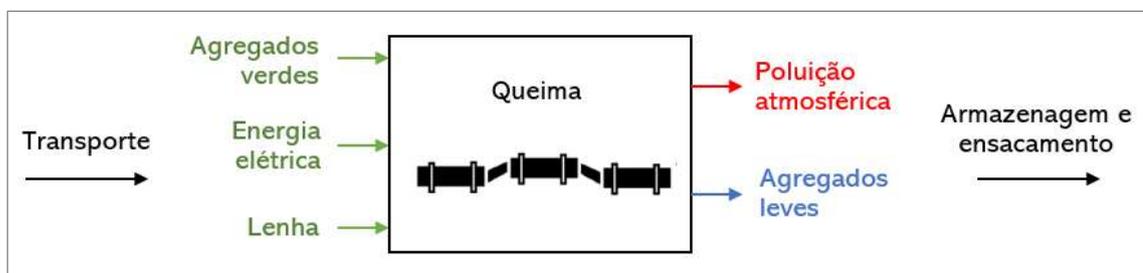
O processo de queima ocorre em três etapas (elevação gradual da temperatura, expansão e resfriamento). Inicialmente, os agregados verdes são direcionados ao calcinador, equipamento destinado a elevar gradualmente a temperatura de aquecimento. Em seguida, os agregados caem diretamente no forno rotativo, onde a temperatura atinge 1175°C, ocorrendo a formação da fase vítrea e a expansão dos agregados. Após o forno, os agregados vão diretamente para o resfriador. Na etapa de queima, os dados contabilizados para o inventário foram: a quantidade de agregados verdes (condição úmida), a energia elétrica utilizada pelos equipamentos, o volume de lenha, as emissões atmosféricas e os subprodutos gerados. A fonte combustível utilizada é a lenha da Algaroba (*Prosopis juliflora*).

As diretrizes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006) estimam que durante o processo de combustão a maior parte do carbono é imediatamente emitida como CO₂, podendo ocorrer liberação de carbono em compostos voláteis como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrocarbonetos não metanos (NMHC). Entretanto, as emissões desses gases possuem quantidades muito pequenas de carbono comparadas às emissões de CO₂. Além disso, tais emissões de CO, CH₄ e NMHC dependem de muitos fatores como tecnologia de combustão, condições de operação e manutenção que, em geral, não são bem conhecidos (IPCC, 2006). Portanto, para o processo de queima foram contabilizadas apenas as emissões de CO₂.

Além disso, em virtude dos diferentes cenários de localização da fábrica, as emissões associadas ao transporte da lenha antes do seu uso foram contabilizadas separadamente. A lenha pode ser proveniente de diversos municípios e a indicação da cidade que abastecerá o consumo de lenha e, conseqüentemente o quantitativo de emissões relacionadas ao seu transporte pelas rodovias, dependerá do cenário escolhido ao final do estudo.

As entradas e saídas do processo de queima estão descritas na Figura 33 e a sua quantificação na Tabela 12.

Figura 33 – DFV do processo elementar de queima



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 12 – Quantificação das entradas e saídas do processo de queima dos agregados

Tipo de fluxo	Descrição	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%	
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.
Entradas	Subproduto Agregados verdes (úmidos)	1,587	t	1,786	t	2,131	t
	Energia Energia elétrica	11,905	kWh	13,393	kWh	15,985	kWh
	Lenha	0,911	tMS	1,025	tMS	1,223	tMS
Saídas	Subproduto Agregados leves	1,000	t	1,000	t	1,000	t
	Emissões Dióxido de carbono (CO ₂)	58,448	kg	65,754	kg	78,478	kg

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: tMS = tonelada de matéria seca.

5.11 Processo elementar de armazenagem e ensacamento dos agregados leves

Os agregados leves, após a queima e resfriamento, são armazenados em silos para comercialização a granel, bem como podem ser separados em sacos valvulados de 10 kg com auxílio de uma válvula dosadora. A composição dos sacos é de polietileno de alta densidade (PEAD). A quantidade prevista para 1 tonelada do agregado é cerca de 100 sacos. A quantidade de polietileno presente nos sacos foi estimada a partir do estudo desenvolvido por Selhorst, Silva e Nobre (2019).

As emissões de CO₂ relacionadas a produção do polietileno de alta densidade não foram quantificadas. Segundo IPCC (2006), emissões de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) não ocorrem durante produção do polietileno de alta densidade.

As entradas e saídas do processo de armazenagem e ensacamento dos agregados leves estão descritas na Figura 34 e a sua quantificação na Tabela 13.

Figura 34 – DFV do processo elementar de armazenamento e ensacamento



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 13 – Quantificação das entradas e saídas do processo de armazenamento e ensacamento

Tipo de fluxo	Descrição	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%		
		Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Entradas	Subproduto	Agregados leves	1,000	t	1,000	t	1,000	t
		Polietileno (PEAD)	3,150	kg	3,150	kg	3,150	kg
	Energia	Energia elétrica	1,875	kWh	1,875	kWh	1,875	kWh
Saídas	Produto final	Agregados leves ensacados	1,000	t	1,000	t	1,000	t
	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	0,165	kg	0,165	kg	0,165	kg

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.12 Agregação dos dados

A agregação dos dados do ICV resultou no somatório de todas as entradas e saídas quantificadas em cada processo elementar. A Tabela 14 apresenta os resultados da agregação dos dados da produção de 1 tonelada do agregado leve para misturas ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%, levando em consideração os três cenários de localização da fábrica e o modelo industrial proposto.

Os diferentes cenários de localização da fábrica influenciam diretamente na quantidade de óleo diesel e nas emissões atmosféricas. As demais quantidades de substâncias permanecem constantes, pois o processo produtivo é o mesmo independentemente da localização da fábrica.

Tabela 14 – Agregação dos dados do ICV

Cenário I - Fábrica em Itajá/RN							
Tipo de fluxo	Substância	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%	
		Entradas	Saídas	Entradas	Saídas	Entradas	Saídas
Recursos	Argila (ton)	1,13 ton		0,62 ton		0,14 ton	
	RBC (ton)	0,00 ton		0,62 ton		1,30 ton	
	Água (m³)	0,45 m³		0,55 m³		0,68 m³	
	Polietileno - PEAD (kg)	3,15 kg		3,15 kg		3,15 kg	
Energia	Óleo diesel (L)	0,46 L		4,17 L		8,31 L	
	Energia elétrica (kWh)	60,00 kWh		66,80 kWh		78,98 kWh	
	Biomassa (tMS)	0,91 tMS		1,03 tMS		1,22 tMS	
Emissões atmosféricas	CO ₂ (kg)		63,90 kg		81,60 kg		106,23 kg
	CO (g)		3,20 g		29,23 g		58,25 g
	NO _x (g)		1,17 g		10,71 g		21,35 g
	MP (g)		1,14 g		10,38 g		20,69 g
	NMHC (g)		18,42 g		168,38 g		335,51 g
Cenário II - Fábrica em Goianinha/RN							
Tipo de fluxo	Substância	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%	
		Entradas	Saídas	Entradas	Saídas	Entradas	Saídas
Recursos	Argila (ton)	1,13 ton		0,62 ton		0,14 ton	
	RBC (ton)	0,00 ton		0,62 ton		1,30 ton	
	Água (m³)	0,45 m³		0,55 m³		0,68 m³	
	Polietileno - PEAD (kg)	3,15 kg		3,15 kg		3,15 kg	
Energia	Óleo diesel (L)	7,22 L		4,12 L		1,29 L	
	Energia elétrica (kWh)	60,00 kWh		66,80 kWh		78,98 kWh	
	Biomassa (tMS)	0,91 tMS		1,03 tMS		1,22 tMS	
Emissões atmosféricas	CO ₂ (kg)		81,97 kg		81,47 kg		87,47 kg
	CO (g)		50,60 g		28,89 g		9,03 g
	NO _x (g)		18,54 g		10,59 g		3,31 g
	MP (g)		17,97 g		10,26 g		3,21 g
	NMHC (g)		291,45 g		166,41 g		52,04 g
Cenário III - Fábrica em Parnamirim/RN							
Tipo de fluxo	Substância	ARG-V 100%		RBC 50%		RBC 90%	
		Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Recursos	Argila (ton)	1,13 ton		0,62 ton		0,14 ton	
	RBC (ton)	0,00 ton		0,62 ton		1,30 ton	
	Água (m³)	0,45 m³		0,55 m³		0,68 m³	
	Polietileno - PEAD (kg)	3,15 kg		3,15 kg		3,15 kg	
Energia	Óleo diesel (L)	6,15 L		4,03 L		2,18 L	
	Energia elétrica (kWh)	60,00 kWh		66,80 kWh		78,98 kWh	
	Biomassa (tMS)	0,91 tMS		1,03 tMS		1,22 tMS	
Emissões atmosféricas	CO ₂ (kg)		79,10 kg		81,21 kg		89,85 kg
	CO (g)		43,08 g		28,20 g		15,28 g
	NO _x (g)		15,79 g		10,34 g		5,60 g
	MP (g)		15,30 g		10,02 g		5,43 g
	NMHC (g)		248,15 g		162,46 g		88,03 g

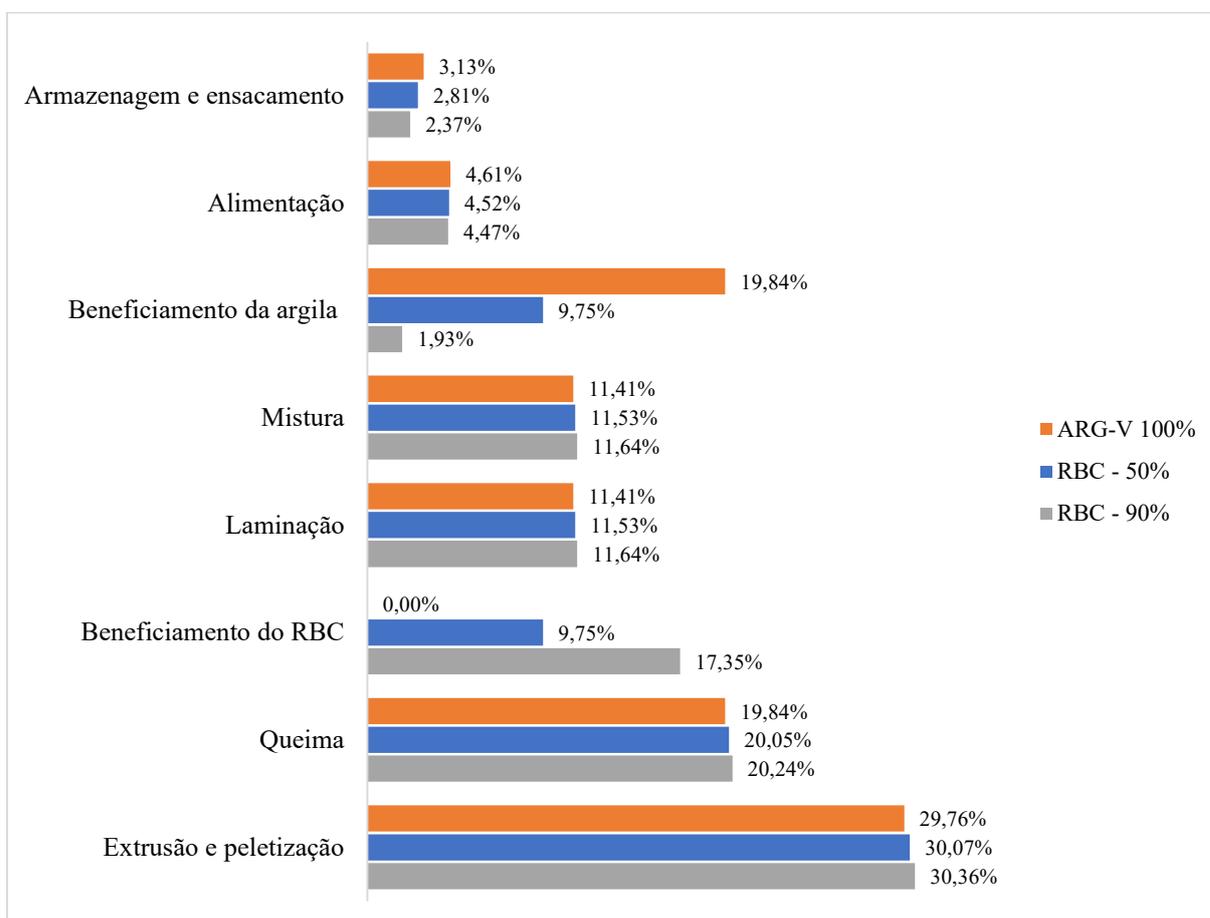
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: tMS = tonelada de matéria seca, PEAD = polietileno de alta densidade, NO_x = óxidos de nitrogênio, MP = material particulado, NMHC = hidrocarbonetos não metano.

O Gráfico 3 representa a porcentagem por processo em relação ao consumo de energia elétrica para cada composição do agregado. Os demais processos que não estão presentes neste gráfico, não requerem o uso de equipamentos elétricos. Os agregados não apresentam diferenças significativas quanto ao consumo de energia elétrica em cada processo, exceto para os processos de beneficiamento da argila e do RBC. Isso ocorre, pois, a depender da composição do agregado, as quantidades de matérias-primas processadas pelos equipamentos possuem variações que interferirem no consumo de energia da etapa. Por exemplo, quanto maior a quantidade da matéria-prima processada, maior o consumo de energia do processo.

O processo de extrusão e peletização dos agregados é a etapa que mais consome energia elétrica, apresentando aproximadamente 30% do consumo total. Os equipamentos dessa etapa (maromba à vácuo e peletizador) possuem alta potência elétrica, refletindo no consumo final de energia. O segundo processo de maior consumo de energia elétrica é o processo de queima dos agregados, cuja representação é de aproximadamente 20% do consumo.

Gráfico 3 – Porcentagem do consumo de energia elétrica por processo para a produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições

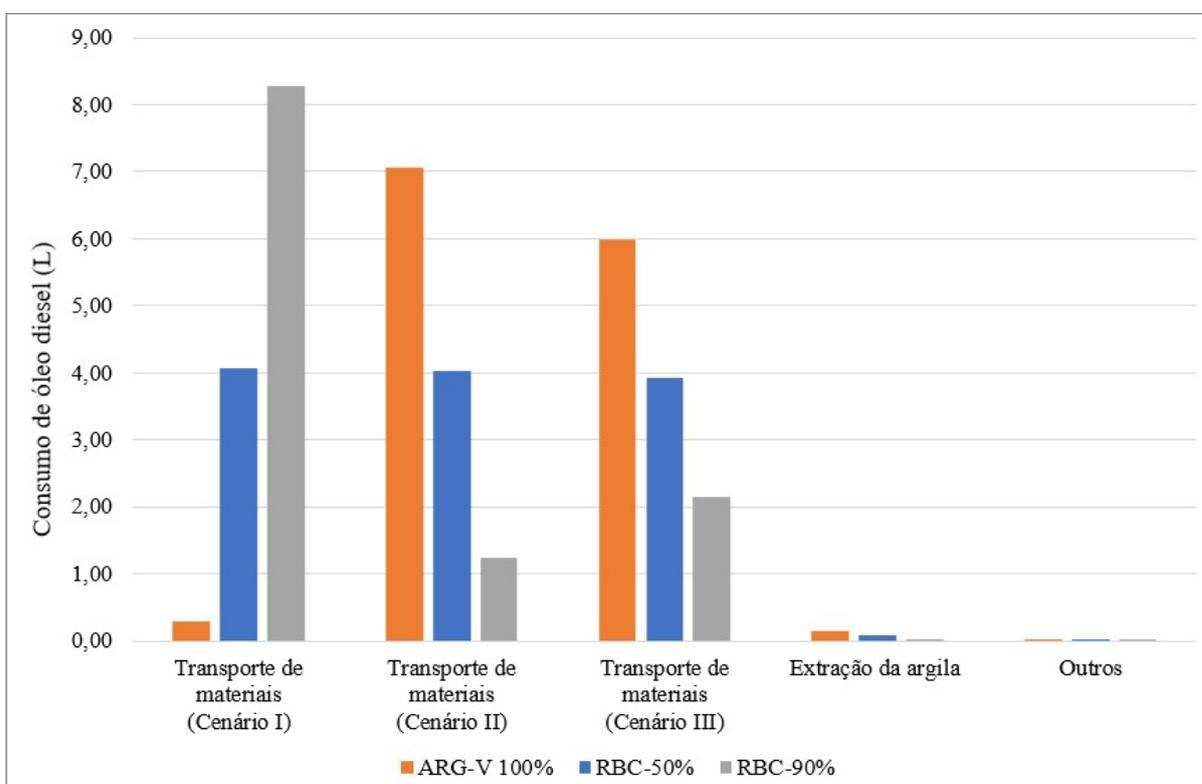


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O Gráfico 4 indica o consumo de óleo diesel em litros nas etapas de transporte das matérias-primas para cada cenário de localização e na extração da argila. As etapas de beneficiamento da argila, beneficiamento do RBC e alimentação não possuem valores significativos de consumo do óleo diesel e estão classificadas na categoria ‘Outros’. Vale ressaltar que as quantidades de óleo diesel aqui representadas estão associadas à unidade funcional de 1 tonelada do agregado leve produzido.

O agregado leve da composição RBC 50% não apresentou variações no consumo de óleo diesel para os três cenários. Isso pode ser explicado, pois nesse tipo de agregado, há uma equivalência nas quantidades de matérias-primas (argila/resíduo), o que resultou em distâncias de transportes equivalentes para os três cenários. Como o consumo de óleo diesel é função da quilometragem percorrida, não houve variações significativas. Resultados diferentes foram observados para a composição RBC-90%, especialmente, devido ao longo trajeto da matéria-prima principal (resíduo).

Gráfico 4 – Consumo de óleo diesel (L) por processo para a produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

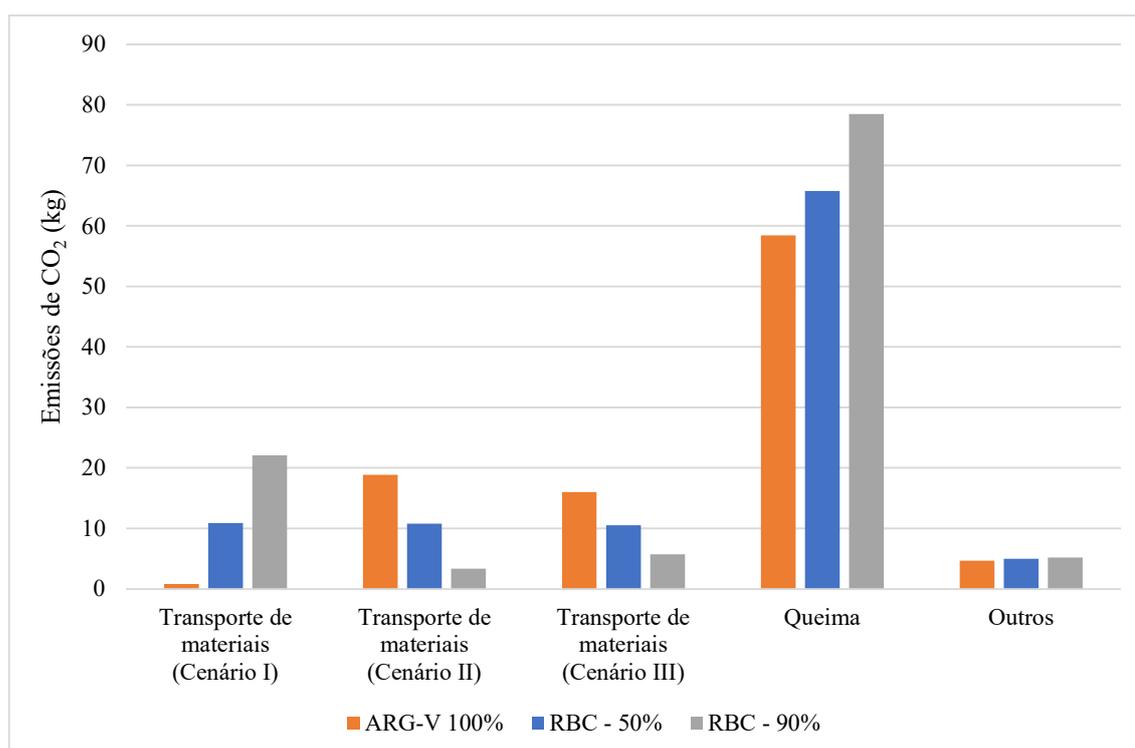
Na categoria de consumo de óleo diesel, o cenário I (produção em Itajá/RN) foi a melhor localização para a produção do agregado ARG-100%, devido à proximidade da matéria-prima

principal (argila). Por outro lado, o cenário I foi a localização mais desfavorável para a produção dos agregados RBC-50% e RBC-90%, devido à influência do transporte do resíduo. Os cenários II e III apresentaram resultados semelhantes.

O processo de extração de argila para as três composições do agregado possui consumo de óleo diesel pouco expressivo em comparação com o processo de transporte dos materiais. O agregado ARG-V 100% devido ao maior teor de argila em sua composição, conseqüentemente possui um maior consumo de óleo diesel no processo de extração. Os agregados com uso de resíduos, RBC-50% e RBC-90%, apresentaram economia significativa no consumo de óleo diesel no processo de extração de argila em comparação com o agregado de argila pura, com redução de 45,31% e 87,21%, respectivamente.

A contribuição nas emissões de CO₂ por processo está representada no Gráfico 5. O processo de queima dos agregados é o principal responsável pelas emissões de CO₂ na produção dos agregados leves, ela representa uma faixa entre 71-91% das emissões. Em seguida, o processo de transporte das matérias-primas é segundo maior contribuinte das emissões de CO₂, onde o cenário I (fábrica localizada em Itajá) se mostra a localização mais desfavorável para as composições com resíduo. As demais etapas não possuem valores significativos de emissões e estão classificadas na categoria ‘Outros’.

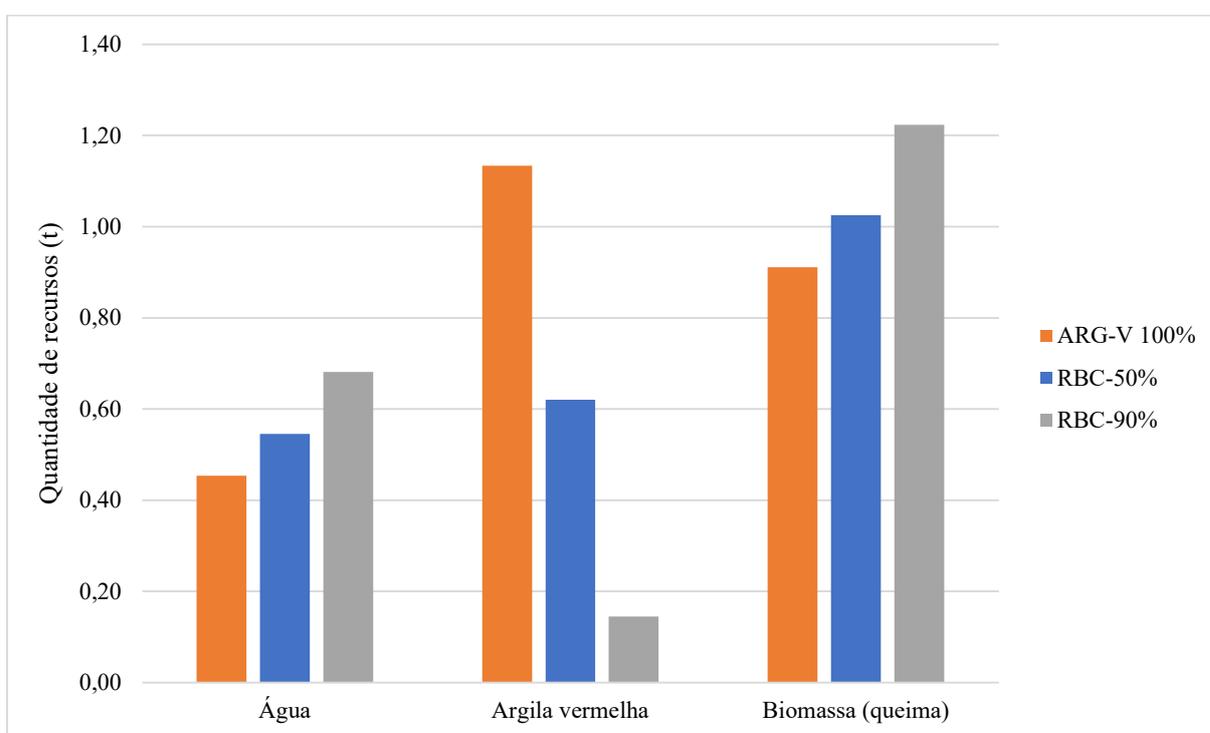
Gráfico 5 – Emissões de CO₂ por processo para a produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Em relação ao consumo de recursos naturais, o Gráfico 6 representa o consumo de água, argila vermelha e biomassa para queima associadas a produção das três composições do agregado leve. O agregado leve de composição ARG-V 100% possui o maior uso da argila vermelha como recurso natural, seguido do agregado RBC-50%. O agregado leve de composição RBC-90% por apresentar um maior o uso de resíduo (RBC) na sua composição, consequentemente resulta em uma redução de 87,21% no consumo de argila em relação ao agregado de composição ARG-V 100%, enquanto que a composição RBC-50% apresenta uma redução de 45,31% em relação ao mesmo recurso.

Gráfico 6 – Consumo de recursos naturais na produção de 1 tonelada do agregado leve em três composições



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

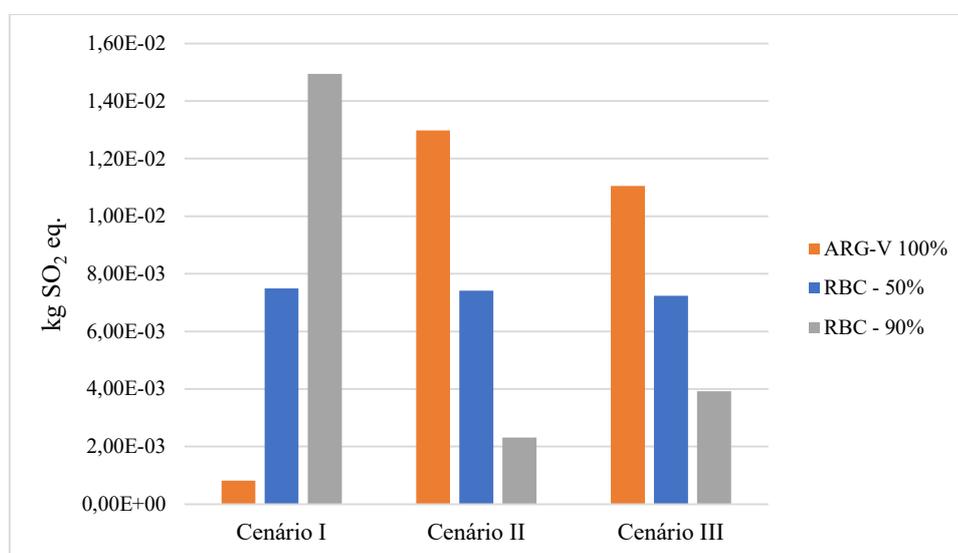
6 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS

Na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), os resultados do inventário (ICV) foram interpretados em categorias de impactos ambientais. Usualmente, os resultados do ICV não são suficientes para a tomada de decisões e são difíceis de serem interpretados individualmente. Sendo assim, faz necessário a conversão dos dados do ICV em potenciais impactos ambientais. Os resultados do inventário foram inseridos no software OpenLCA 1.10. A abordagem utilizada foi a direcionada a problemas (*midpoint*) por meio do método CML 2001.

6.1 Potencial de acidificação

O potencial de acidificação reflete o impacto gerado na produção dos agregados leves através da emissão dos óxidos de nitrogênio e enxofre para o ar, solo e água. Por consequência, esse impacto pode conduzir a mudanças na acidez da água e solo e seus efeitos podem causar alterações tanto na fauna quanto na flora (CHEHEBE, 2002). A unidade de referência é 1 kg de SO₂ equivalente. O resultado do potencial de acidificação para a produção de 1 tonelada do agregado leve para as três composições em cada cenário de localização da fábrica está indicado no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Potencial de acidificação da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No cenário I (produção em Itajá/RN), a composição ARG-V 100% apresentou o melhor resultado, devido à proximidade do local de obtenção da matéria-prima principal dessa composição, a argila. A composição RBC-90% apresentou o maior potencial de acidificação no mesmo cenário, pois este agregado requer maior quantidade de resíduo e o cenário I é a localização mais distante do ponto de obtenção do RBC (Arês/RN), isso resulta em maiores emissões de NO_x devido ao consumo de óleo diesel na etapa de transporte do RBC para Itajá/RN.

A produção do agregado leve de composição RBC-50% apresentou potencial de acidificação equivalente para os três cenários, pois requer as mesmas quantidades de matérias-primas (argila/resíduo), o que resultou em distâncias de transportes equivalentes nas três localizações. O cenário II (produção em Goianinha/RN) e cenário III (produção em Parnamirim/RN) apresentaram padrões semelhantes nos resultados do potencial de acidificação.

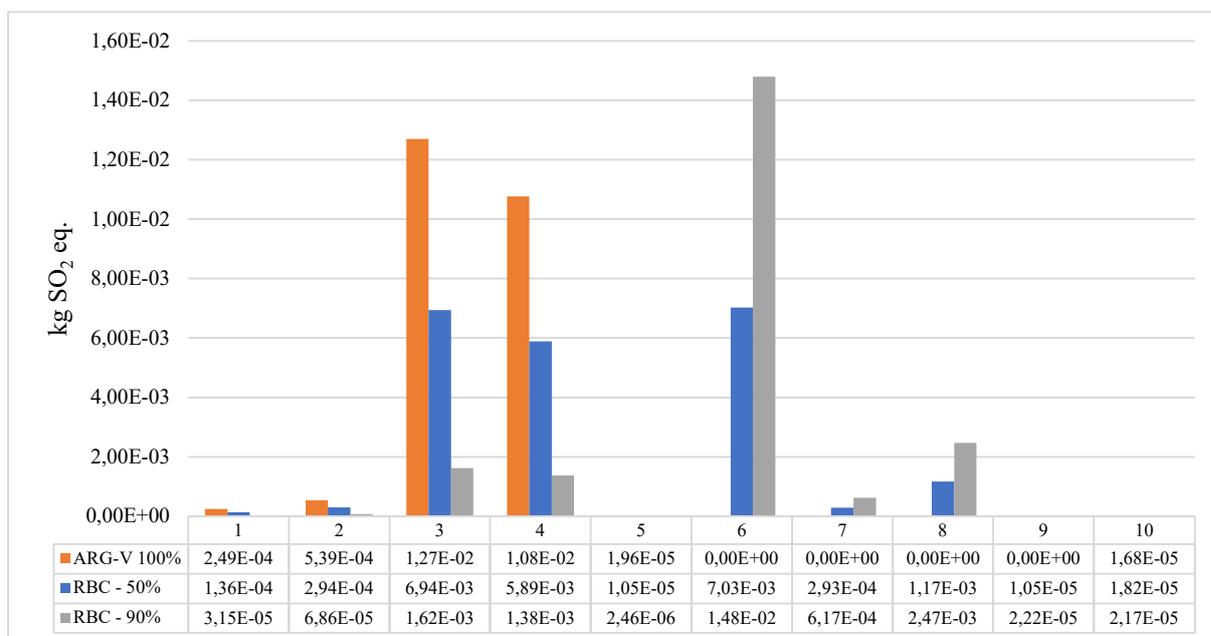
No cenário II (produção em Goianinha/RN), o agregado RBC-50% apresentou um aumento de 2,44% do potencial de acidificação comparando-se com o cenário III. Isso pode ser explicado devido à proximidade do ponto de coleta da argila. Entretanto, no cenário II, o agregado com maior porcentagem de resíduo, RBC-90%, apresentou uma redução de 40,88% no potencial de acidificação em comparação com o cenário III. Vale ressaltar que a argila vermelha pode ser explorada em jazidas mais próximas aos cenários II e III. Isso conduziria a uma redução ainda maior no potencial de acidificação da produção dos agregados leves.

O agregado ARG-V 100% produzido em Itajá/RN apresentou potencial de acidificação com uma ordem de grandeza inferior aos obtidos por Martinez-Arguellez *et al.* (2019), que em seu estudo sobre impactos ambientais da produção de agregados naturais graúdos, obteve valores de 4,80E-01 kg de SO₂ eq. Cuenca-Moyano *et al.* (2018) apontam valores de potencial de acidificação de 1,59E-02 kg de SO₂ eq. para a produção de agregados naturais miúdos. No estudo realizado por Faleschini *et al.* (2016), foram encontrados valores de potencial de 1,51E-02 kg de SO₂ eq. para agregados naturais de alta qualidade. Em comparação com esses autores, os agregados RBC-50% e RBC-90% apresentaram valores abaixo dos citados em todos os cenários. Não foram encontrados estudos com agregados leves com as mesmas condições de unidade funcional e fronteira de sistema para comparação.

O potencial de acidificação em cada etapa da produção dos agregados leves está representado no Gráfico 8. As etapas que apresentaram valor nulo (mistura, laminação, extrusão e peletização, queima, armazenagem e ensacamento), não foram inseridas no gráfico. Observa-se que o transporte da argila e do RBC são os processos que mais contribuem para o potencial

de acidificação. O uso do óleo diesel, combustível produzido por fontes não-renováveis, nas etapas de transporte muito contribui para o potencial de acidificação, devido a emissão de substâncias acidificantes durante a sua combustão.

Gráfico 8 – Potencial de acidificação por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

Os efeitos da acidificação possuem impactos em escala geográfica local e regional. A emissão de substâncias acidificantes na atmosférica e sua deposição na água e solo conduz a uma redução do pH e aumento da acidificação. Suas consequências podem provocar a degradação do solo e refletir no desenvolvimento de plantas, visto que o pH interfere nas reações do solo e na atividade de elementos fitotóxicos. Alguns solos com alcalinidade natural são capazes de neutralizar os efeitos da acidificação dentro de alguns níveis de tolerância. Entretanto, quando a capacidade dos solos em neutralizar os ácidos atmosféricos não é suficiente, ocorre a acidificação.

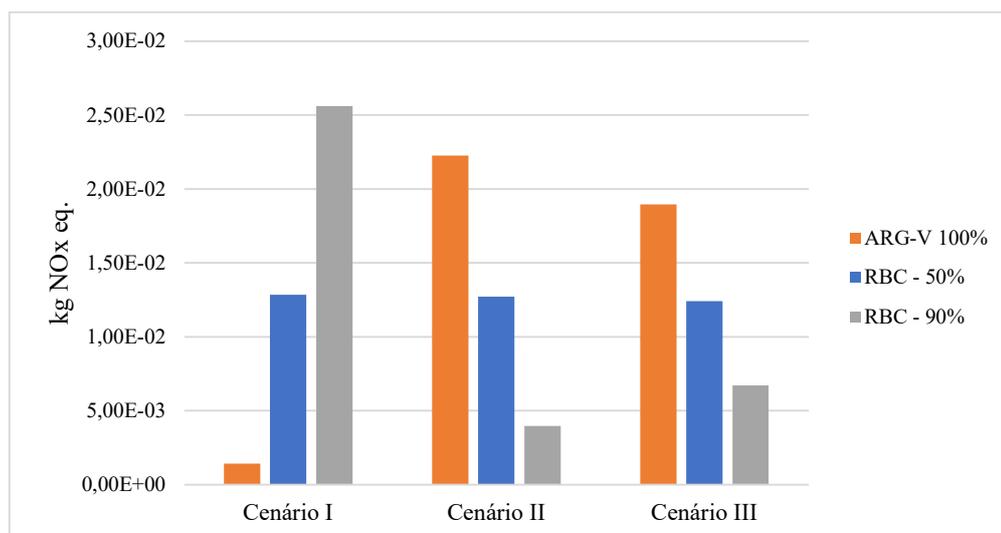
Na região inserida do local de instalação da fábrica, os efeitos podem ser sentidos na produtividade de culturas agrícolas da região e alteração da paisagem local do semiárido brasileiro. Outro aspecto, é a acidificação dos corpos d'água, que podem resultar na alteração da biodiversidade aquática. Também podem ser citados os efeitos de agentes

acidificantes sobre a saúde humana, como obstrução das vias respiratórias, irritação dos olhos e trato respiratório.

6.2 Potencial de eutrofização

O potencial de eutrofização indica os efeitos da produção dos agregados leves em relação ao aumento de nutrientes nos ecossistemas aquáticos, provocando alterações na concentração de oxigênio e na biodiversidade. Os principais nutrientes são fósforo e nitrogênio. A unidade de referência é 1 kg de NO_x equivalente. O potencial de eutrofização para a produção de 1 tonelada do agregado leve para as três composições nos diferentes cenários de localização da fábrica está indicado no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Potencial de eutrofização da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

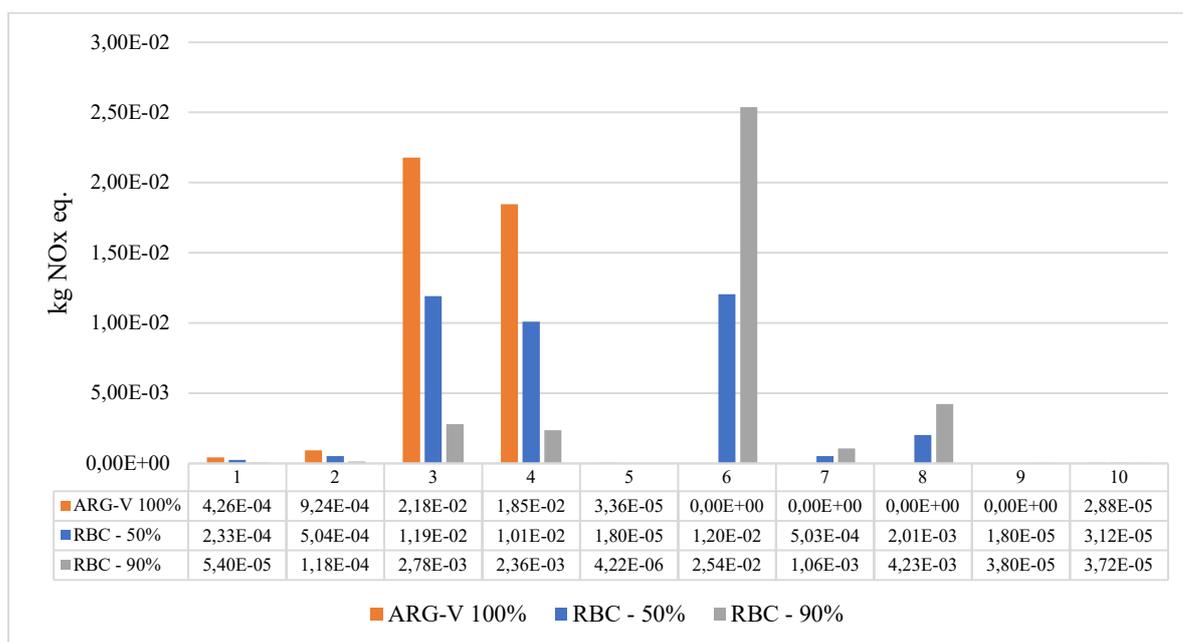
Em termos ambientais relacionados à eutrofização, o cenário I (produção em Itajá/RN) apresenta-se como o mais desfavorável para as composições com uso de resíduo. Esse fato novamente se justifica pelas distâncias de transporte até o local das matérias-primas, destacadas anteriormente para o potencial de acidificação. Nesse cenário, portanto, as composições com uso de resíduo são aquelas que mais colaboram para a emissão de óxidos de nitrogênio no ecossistema.

Os cenários II (Goianinha/RN) e III (Parnamirim/RN) apresentaram resultados semelhantes. A composição RBC-90% possui menor impacto de eutrofização no cenário II.

Isso ocorre, pois a produção em Goianinha/RN favorece as composições com uso de resíduo, devido à proximidade do local da matéria-prima.

O potencial de eutrofização nas etapas da produção dos agregados leves está indicado no Gráfico 10. Os processos que contribuem para a eutrofização estão associados ao consumo de óleo diesel, como extração da argila, transporte e beneficiamento das matérias-primas e alimentação da produção.

Gráfico 10 – Potencial de eutrofização por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

Observa-se que o transporte das matérias-primas (argila e do RBC) são os processos que mais contribuem para o potencial de eutrofização, isso ocorre devido as emissões de óxidos de nitrogênio associadas à combustão do óleo diesel. Os processos de extração da argila, beneficiamento das matérias-primas e alimentação da produção possuem impactos pouco significativos em comparação com o transporte das matérias-primas.

Quando a matéria-prima está próxima ao local da fábrica, as emissões são reduzidas consideravelmente, é o caso do transporte da argila no cenário I (Itajá/RN) e do transporte do RBC no cenário II (Goianinha/RN). Por exemplo, para a composição RBC-90%, ao comparar

a etapa de transporte do resíduo no cenário I (local mais distante) com o cenário II (local mais próximo), houve uma redução significativa de 95,83% nas emissões de óxidos de nitrogênio. Isso indica que a localização da fábrica pode influenciar significativamente nos impactos ambientais locais.

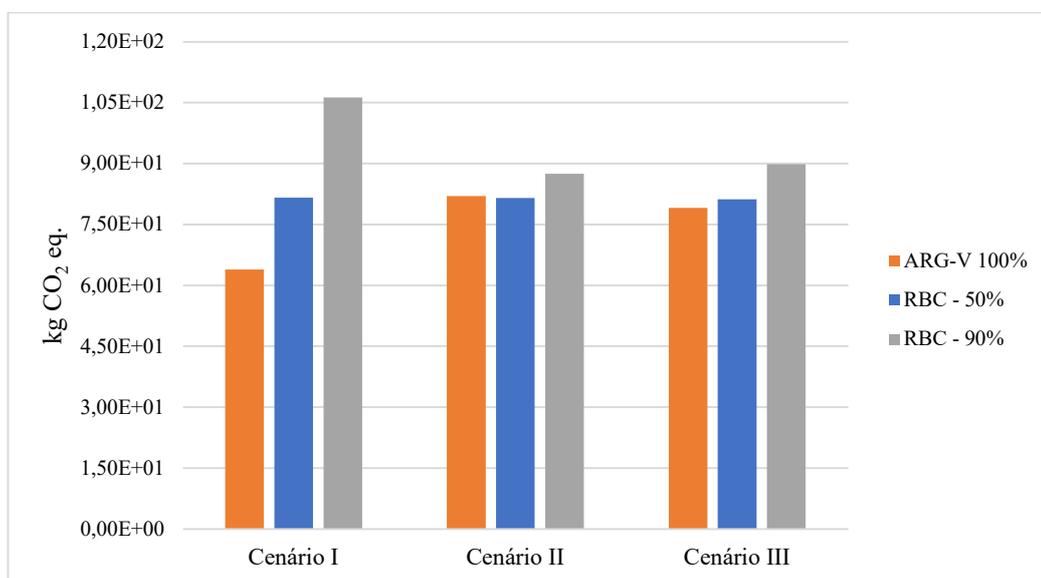
Os efeitos relacionados ao potencial de eutrofização possuem impactos locais. O acúmulo de nutrientes contribui para o aumento excessivo de plantas aquática nos corpos d'água. Como consequências, a eutrofização pode ocasionar alterações na cor e turbidez da água, redução da concentração do oxigênio dissolvido e alterações na biota aquática.

No local da instalação da fábrica, os impactos ambientais decorrentes da eutrofização podem provocar alterações da qualidade da água nas fontes de abastecimento locais (represas, açudes, rios, por exemplo), inibindo seu uso para consumo humano, animal e agricultura. Com isso, os danos podem interferir nos custos de abastecimento locais de água potável, devido a necessidade de tratamento. Além disso, danos podem ser sentidos em atividades de recreação em represas e rios, bem como no comércio de peixes local devido a contaminação por algas tóxicas.

6.3 Potencial de aquecimento global

O potencial de aquecimento global indica o efeito da produção dos agregados leves nas mudanças climáticas. O aumento das quantidades de CO₂, N₂O e CH₄ e outros gases de efeito estufa provocam um aumento da absorção das radiações da superfície terrestre, resultando em um processo de aquecimento global. Neste estudo, apenas foi considerado o gás CO₂, como contribuinte principal para o aquecimento global. A unidade de referência é 1 kg de CO₂ equivalente. O Gráfico 11 mostra o resultado do potencial de aquecimento global para a produção de 1 tonelada do agregado leve para as três composições nos três cenários de localização da fábrica.

Gráfico 11 – Potencial de aquecimento global da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

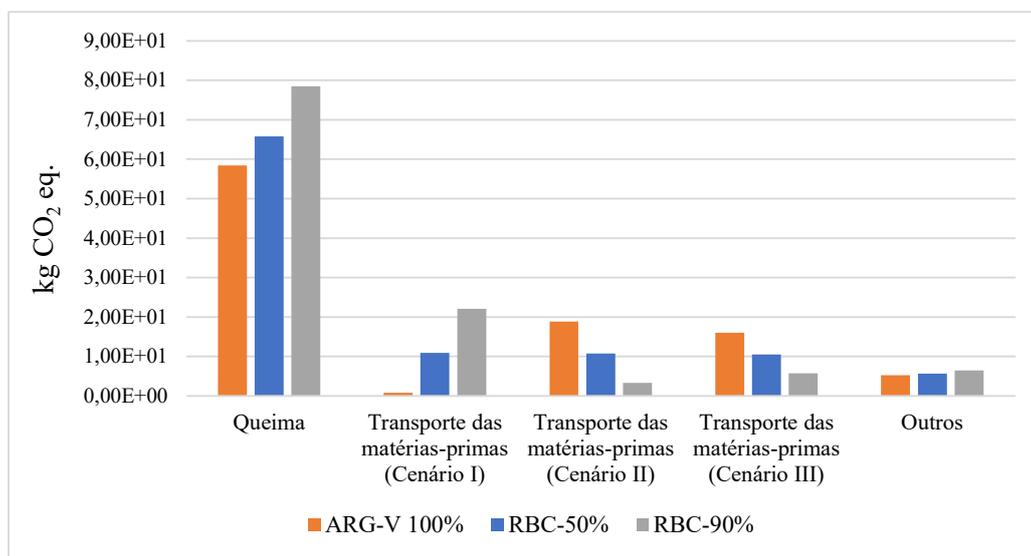
Na categoria de aquecimento global, o cenário I (produção em Itajá/RN) se apresenta como o favorável para o agregado ARG-V 100% e o mais desfavoráveis composições com mais uso resíduo, RBC-90%. Isso ocorre, em especial, devido a longa distância de transporte do RBC até o local da fábrica, o que resulta em altas emissões de CO₂ associadas a combustão do óleo diesel em comparação com os demais cenários, especialmente para o agregado de composição RBC-90%.

Os cenários II e III apresentaram resultados equivalentes. A produção do agregado RBC-50% manteve uma média de emissão de 81,43 kg de CO₂ eq./t do agregado produzido para os três cenários. O valor mais baixo de emissão de CO₂ para o agregado RBC-90% foi de 87,48 kg de CO₂ eq./t do agregado produzido para produção em Goianinha/RN (cenário II) e o valor mais alto foi de 106,24 kg de CO₂ eq./t para produção em Itajá/RN (cenário II), local mais distante do resíduo. O agregado de argila pura ARG-V 100% manteve uma faixa de 63,90 a 81,97 kg de CO₂ eq./t do agregado produzido.

Ingrao *et al.* (2018) alcançaram valores de 156 kg de CO₂ eq./m³ de argila expandida produzida na Itália. Os autores utilizaram uma abordagem *gate-to-gate*, com uso de carvão como combustível para o forno rotativo. Após a substituição do carvão por resíduo agrícola (palha), o potencial de aquecimento global reduziu para 53,45 kg de CO₂ eq./m³ de argila expandida produzida. Portanto, o uso de combustíveis alternativos é fundamental para a redução de emissões de CO₂ e conservação dos recursos naturais.

As etapas mais relevantes em termos de emissão de CO₂ são o transporte e a queima, com potencial de aquecimento global apresentados no Gráfico 12. As demais etapas não possuem valores significativos de emissões de CO₂ e estão classificadas na categoria ‘Outros’.

Gráfico 12 – Potencial de aquecimento global por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O processo de queima é a etapa de maior contribuição para o potencial de aquecimento global. Isso ocorre devido as emissões da queima da biomassa no forno rotativo e do tempo de uso dos equipamentos necessários a queima (calcinador, forno rotativo, lavador de gás e resfriador). Os equipamentos possuem potência elétrica elevada o que demanda quantidades elevadas de energia elétrica durante seu uso em regime contínuo.

A lenha da algaroba como biomassa para queima é uma importante fonte de energia para forno rotativo. Entretanto, sua combustão emite substâncias poluentes, como o dióxido de carbono, um dos principais responsáveis pelo aquecimento global. Para redução das emissões, é importante a otimização da etapa da queima, como o reaproveitamento da energia térmica do forno e a combinação com novas fontes de energia como painéis fotovoltaicos.

O processo de transporte das matérias-primas é o segundo maior contribuinte para o potencial de aquecimento global. O óleo diesel é derivado de combustíveis fósseis e contém alta quantidade de carbono. Dentre os gases resultantes da combustão do óleo diesel, o CO₂ é gás liberado em maiores quantidades. Esse fator contribuiu para as altas emissões de CO₂ relacionadas a etapa de transporte. Consequentemente, longas distâncias de transporte conduzem a maiores quantidades de emissões atmosféricas.

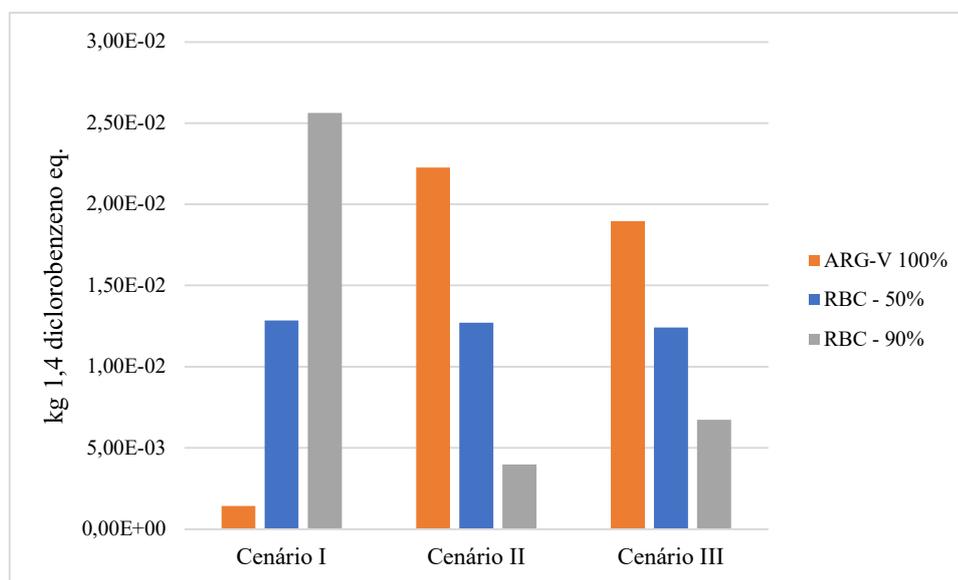
As consequências da emissão de CO₂ são sentidas em escala global. O resultado é o aumento da temperatura média da terra e aumento do nível dos oceanos. Além disso, os efeitos podem conduzir a períodos mais prolongados de seca, inundações mais frequentes, redução de florestas e alterações nos padrões de vento.

6.4 Potencial de toxicidade humana

O potencial de toxicidade humana indica os efeitos relacionados à exposição a substâncias tóxicas no ar, água ou solo para saúde humana. Dentre as substâncias que provocam toxicidade a saúde humana podem ser citados os metais pesados, óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado e óxidos de enxofre (SO_x). Algumas dessas substâncias são liberadas durante a queima de combustíveis fósseis e podem causar danos ao sistema respiratório dos indivíduos expostos aos poluentes.

O Gráfico 13 mostra os resultados do potencial de toxicidade humana na produção dos agregados leves. A unidade de referência é o kg 1,4-diclorobenzeno (C₆H₄Cl₂) equivalente.

Gráfico 13 – Potencial de toxicidade humana da produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A principal substância contribuinte para o potencial de toxicidade humana na produção dos agregados leves foi o óxido de nitrogênio resultante da combustão do óleo diesel no transporte das matérias-primas. A exposição ao óxido de nitrogênio pode causar irritabilidade aos olhos, nariz e mucosas, doenças respiratórias (asma, bronquite, por exemplo) e, em casos

mais graves, câncer. Portanto, é importante o estabelecimento de padrões de qualidade do ar e o controle de poluição resultante de gases de escape de veículos.

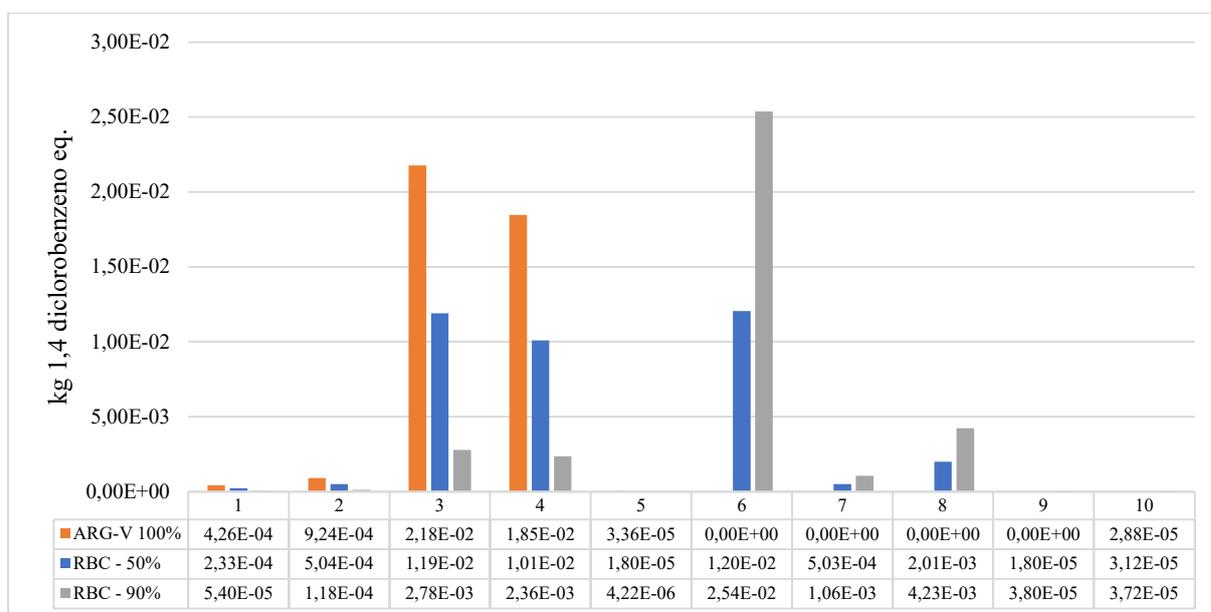
O padrão de resultado do potencial de toxicidade humana para cada cenário de localização da fábrica foi o mesmo encontrado nas categorias de acidificação e eutrofização. Isso se deve porque as emissões atmosféricas são quantificadas em função de apenas uma unidade básica, a quantidade de óleo diesel contabilizada em cada processo elementar.

O agregado ARG-V 100% apresentou uma redução do potencial de toxicidade com valor de $1,41E-03$ kg 1,4-diclorobenzeno eq./t na localização mais próximas ao local de obtenção da argila, representada pelo cenário I (Itajá/RN). Do mesmo modo, o agregado RBC-90% apresentou menor potencial de toxicidade humana ($2,23E-02$ kg 1,4-diclorobenzeno eq./t) para o cenário II (Goianinha/RN), localização mais próxima do ponto de coleta do RBC. O agregado RBC-50% manteve uma média de $1,27E-02$ kg 1,4-diclorobenzeno eq./t.

Independente do cenário de localização, os valores obtidos para o potencial de localização estão abaixo dos valores encontrados por Faleschini *et al.* (2016) para agregados naturais. Os autores encontraram valores de $2,09E-01$ e $2,18E-01$ kg 1,4-diclorobenzeno eq./t para agregados naturais de baixa e alta qualidade, respectivamente.

Os resultados também foram obtidos para cada etapa produtiva (Gráfico 14).

Gráfico 14 – Potencial de toxicidade humana por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

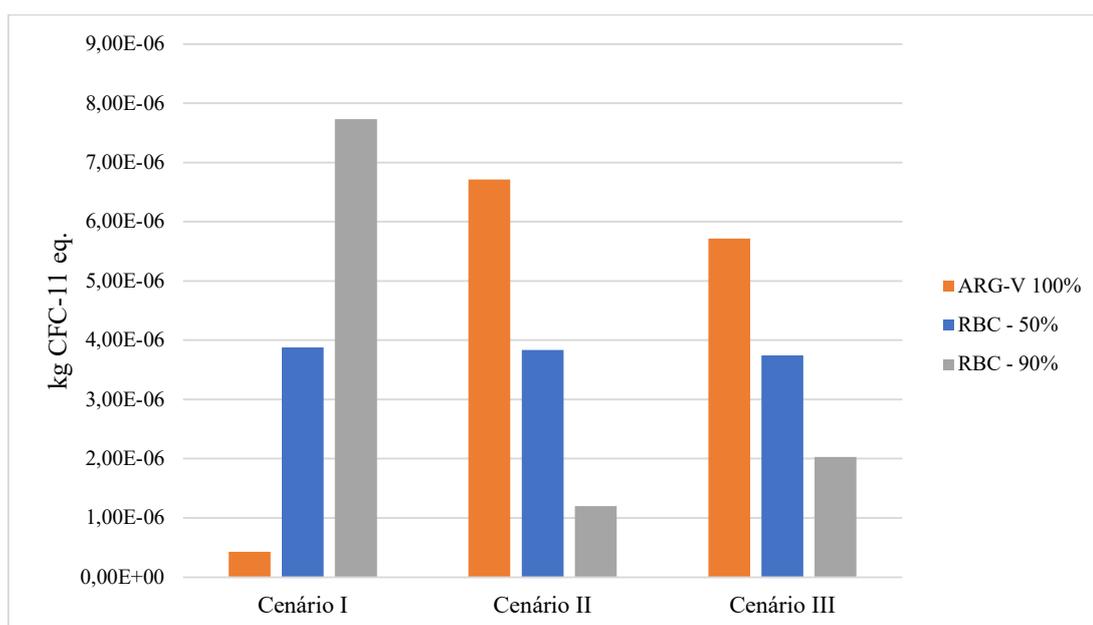
As etapas de transporte de matérias-primas apresentaram os maiores valores de potencial de toxicidade humana. As etapas de alimentação da produção e beneficiamento da argila vermelha e RBC apresentaram valores pequenos comparados as demais etapas. Isso porque as distâncias percorridas pela pá carregadeira nessas etapas são muito pequenas em relação as distâncias de transporte pelo caminhão de coleta das matérias-primas até o local da fábrica, o que reflete nas baixas emissões atmosféricas.

A toxicidade humana possui impacto local e regional. Vale ressaltar a importância da manutenção dos veículos em condições adequadas e utilização de filtros para reduzir a poluição do ar, em especial, para populações expostas ao longo das rotas de transporte.

6.5 Potencial de depleção da camada de ozônio

A redução da camada de ozônio conduz a um crescimento na quantidade de raios ultravioletas que atingem a superfície terrestre, podendo resultar em interferências nos ecossistemas, danos a materiais e crescimento de doenças (CHEHEBE, 2002). O potencial de depleção da camada de ozônio na produção de 1 tonelada do agregado leve para as três composições nos três cenários de localização da fábrica está mostrado no Gráfico 15. A unidade de referência é kg CFC-11 equivalente.

Gráfico 15 – Potencial de depleção da camada de ozônio na produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica

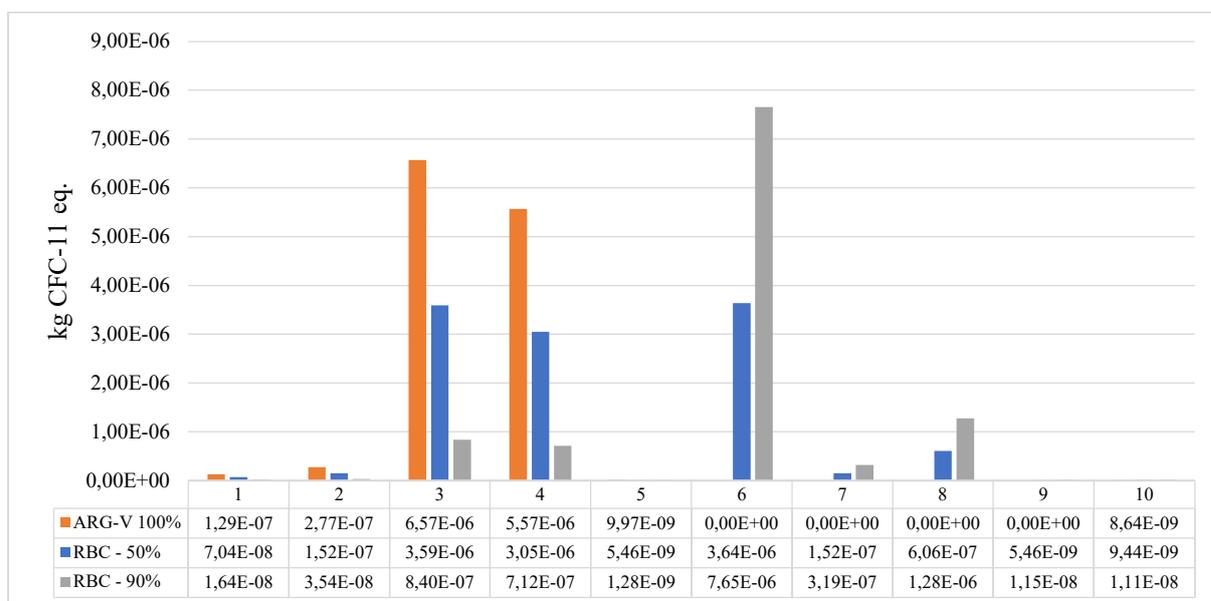


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Foram encontrados valores de 4,27E-07 a 6,71E-06 kg CFC-11 eq./t para agregado de argila pura (ARG-V 100%) e valores de 1,20E-06 a 7,73E-06 para o agregado RBC-90%. O potencial de depleção da camada de ozônio do agregado RBC-50% manteve um valor médio de 3,82E-06 kg CFC-11 eq./t. As substâncias contribuintes para o potencial de redução da camada de ozônio são decorrentes dos subprodutos da combustão. Logo, os resultados refletem os impactos ambientais associados as etapas que mais consomem óleo diesel, devido as longas distâncias de transporte.

A partir do Gráfico 16, é possível identificar de maneira mais clara que as etapas que mais contribuem para a depleção da camada de ozônio são o transporte da argila e do RBC até o local da fábrica.

Gráfico 16 – Potencial de depleção da camada de ozônio por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

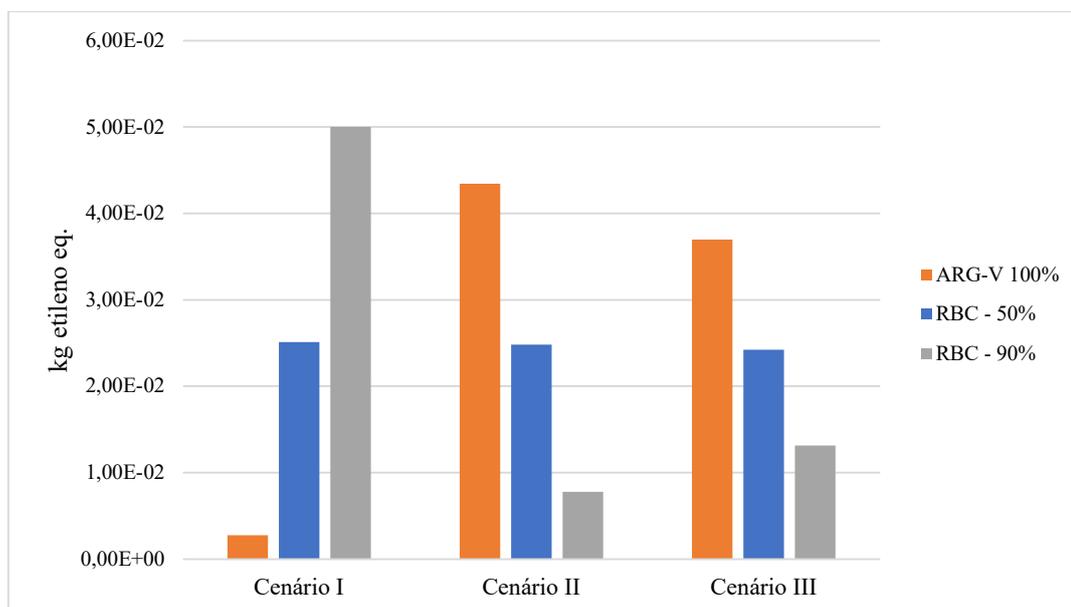
Os efeitos relacionados a redução da camada de ozônio possuem impactos globais. O ozônio presente na atmosfera é importante para a absorção dos raios ultravioleta. Com a redução dessa camada protetora e o aumento de raios ultravioleta, podem causar doenças de pele, alterações no desenvolvimento de plantas e mutações genéticas. Os efeitos podem comprometer o desenvolvimento de culturas agrícolas e contribuir para o processo de extinção da vegetação da Caatinga, vegetação predominante no Nordeste brasileiro.

6.6 Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos

O potencial de formação de oxidantes fotoquímicos indica os efeitos da reação de óxidos de nitrogênio com substâncias orgânicas voláteis sob influência de raios ultravioletas, resultando em oxidantes fotoquímicos (CHEHEBE, 2002). Os poluentes primários resultantes das emissões de veículos (principalmente, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio) reagem na atmosfera sob ação da luz solar formando compostos secundários, como ozônio e aldeídos. O efeito visível é a formação de um nevoeiro (ou *smog* fotoquímico) constituído por gases poluentes primários e secundários.

O Gráfico 17 mostra os resultados do potencial de formação de oxidantes fotoquímicos em relação a produção de 1 tonelada do agregado leve para as três composições nos três cenários de localização da fábrica. A unidade de referência é kg etileno equivalente.

Gráfico 17 – Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos na produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



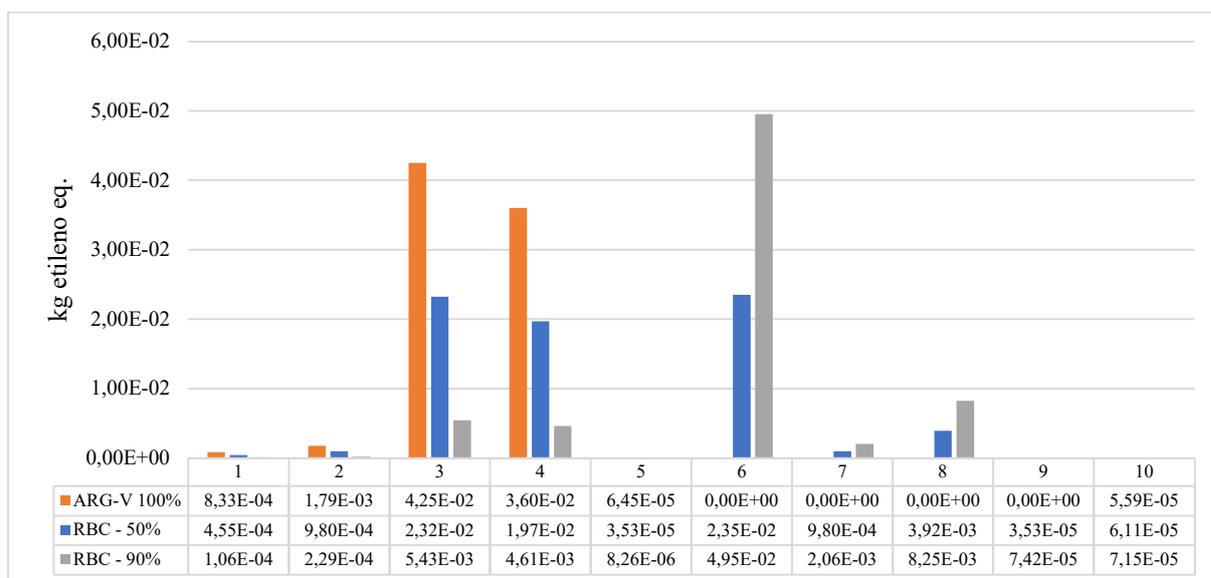
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os agregados leves apresentaram valores entre $2,75E-03$ a $5,00E-02$ kg etileno eq./t para a categoria de formação de oxidantes fotoquímicos. As distâncias de transporte e o consumo de óleo diesel possuem influência significativa nos resultados, isso em razão do quantitativo de emissões atmosféricas gerados nas rotas de transporte contribuir diretamente nos resultados da categoria.

Os efeitos da formação de oxidantes fotoquímicos possuem impactos locais. Os compostos são agressivos à saúde dos seres humanos, plantas e animais. O ozônio pode prejudicar as funções pulmonares, agravar doenças cardíacas e causar irritação aos olhos. Os danos também podem ser sentidos na vegetação local, como alterações no desenvolvimento de plantas e diminuição da resistência a pragas e à seca, o que contribui para redução da vegetação nativa local.

Os resultados da categoria em cada etapa da produção dos agregados estão indicados no Gráfico 18. As etapas que mais contribuem para a depleção da camada de ozônio são o transporte da argila e do RBC até o local da fábrica, devido aos poluentes emitidos durante combustão do óleo diesel.

Gráfico 18 – Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

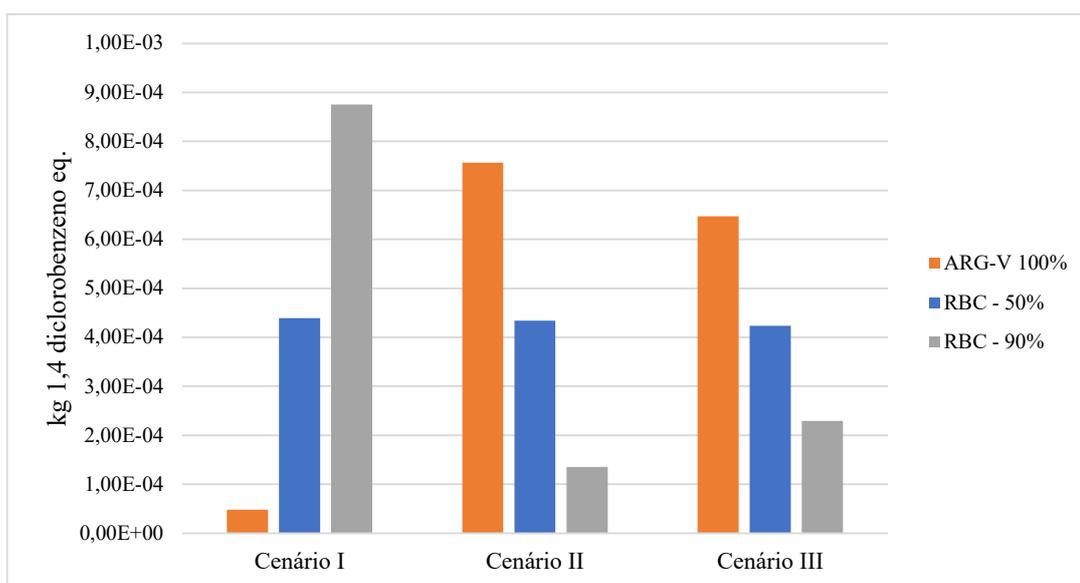
Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

6.7 Ecotoxicidade

A emissão de substâncias tóxicas relacionadas a produção dos agregados leves pode provocar danos em diferentes espécies no solo e na água. Diversas substâncias podem provocar a ecotoxicidade, como os metais pesados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) e compostos orgânicos voláteis não-metano. Concentrações elevadas de substâncias tóxicas na

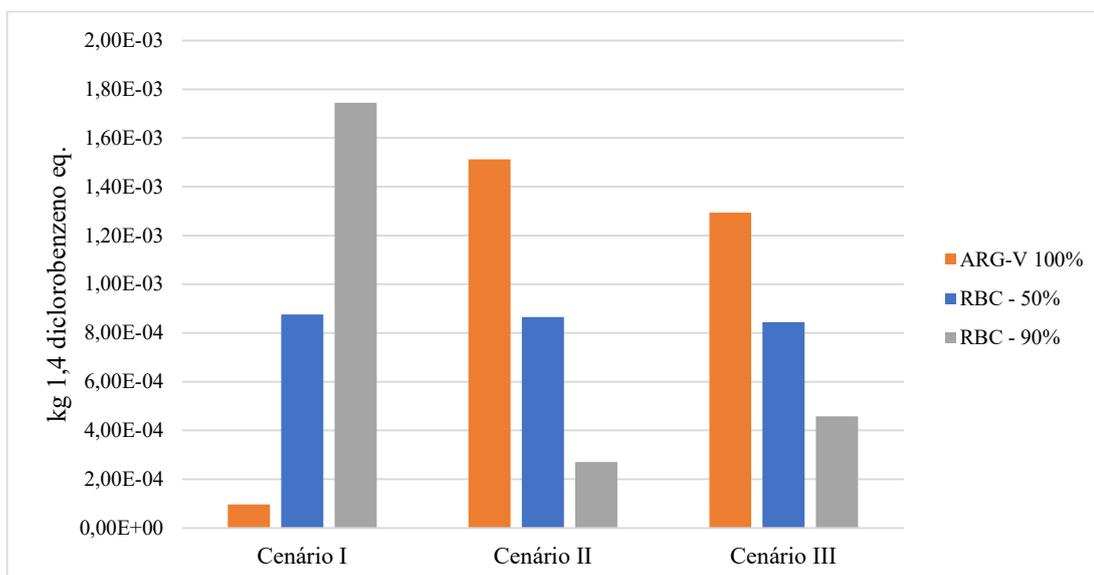
água podem comprometer a autodepuração, causando danos a fauna e flora inserida no corpo hídrico. Do mesmo modo, substâncias tóxicas podem causar impactos aos ecossistemas terrestres. Os resultados dessa categoria foram indicados em relação a ecotoxicidade terrestre (Gráfico 19), ecotoxicidade marinha (Gráfico 20) e ecotoxicidade em água doce (Gráfico 21). A unidade de medida é kg 1,4-diclorobenzeno ($C_6H_4Cl_2$) equivalente.

Gráfico 19 – Potencial de ecotoxicidade terrestre na produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



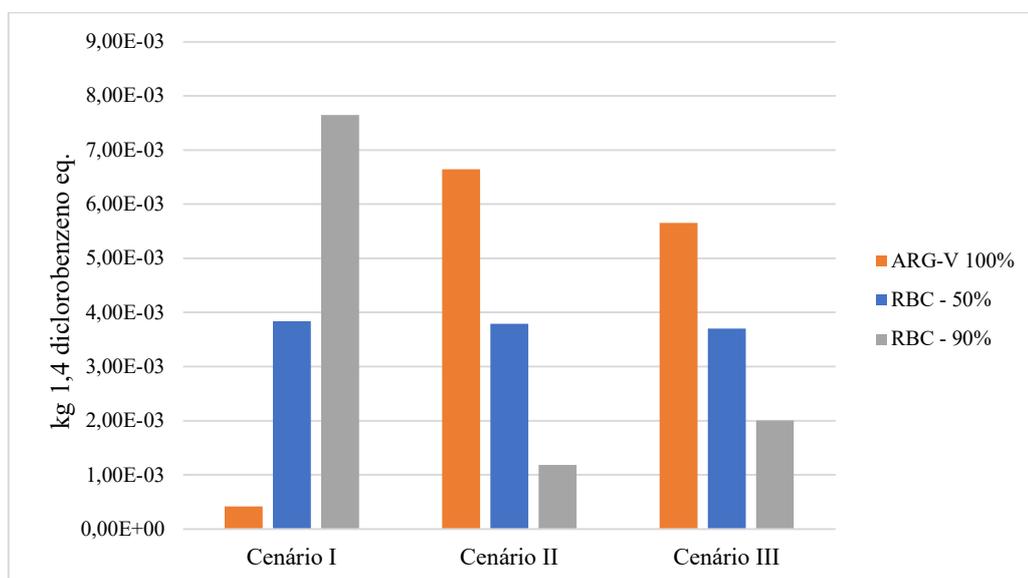
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 20 – Potencial de ecotoxicidade marinha na produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 21 – Potencial de ecotoxicidade em água doce na produção dos agregados leves em diferentes cenários de localização da fábrica



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

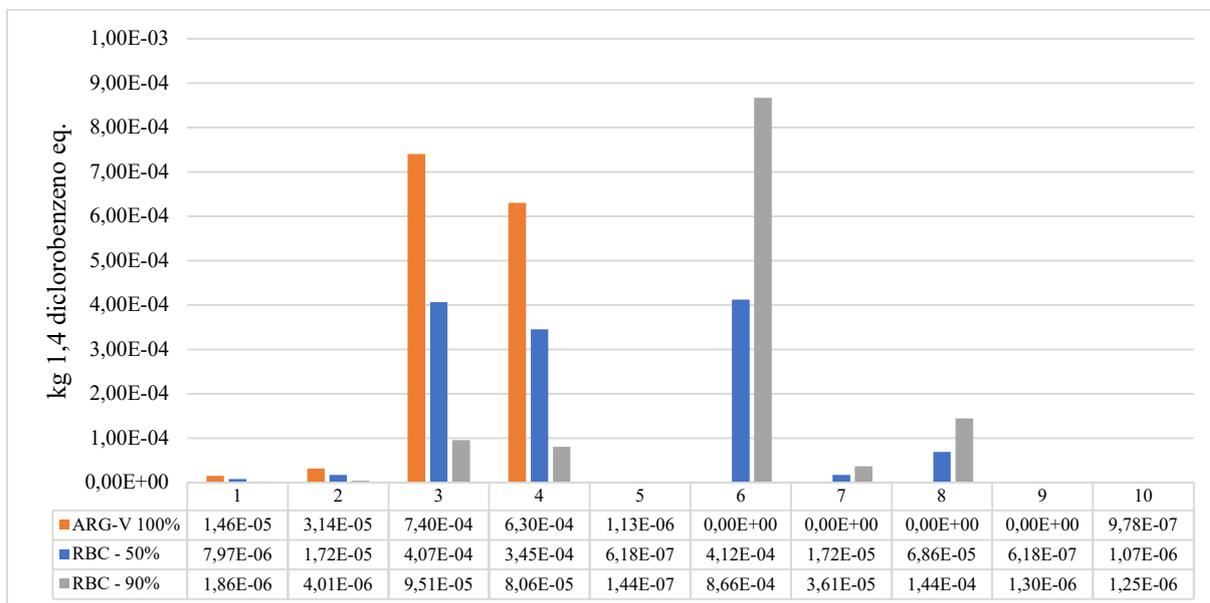
Os resultados das categorias de ecotoxicidade terrestre, marinha e de água doce apresentaram padrões característicos com variações na magnitude dos impactos. O agregado ARG-V 100% contribuiu para maiores emissões de substâncias tóxicas no cenário II (produção em Goianinha/RN), tanto nos ecossistemas terrestres e aquáticos (marinho e água doce). O menor valor para o agregado foi avaliado no cenário I (Itajá/RN), devido à proximidade com jazida e, por não utilizar resíduo em sua composição, as emissões de substâncias tóxicas associadas ao transporte foram reduzidas.

O agregado RBC-90% obteve os melhores resultados no cenário II (Goianinha/RN). O RBC-90% apresentou uma redução de 68,73% de emissões de substâncias tóxicas em comparação com a produção do agregado RBC-50% no cenário II, tanto em ecossistemas terrestres quanto aquáticos (marinha e água doce). Por outro lado, devido as elevadas distâncias de transporte do resíduo, o RBC-90% apresentou as maiores magnitudes de ecotoxicidade no cenário I em comparação com os demais agregados.

No cenário II (Goianinha/RN), os agregados com uso de resíduo RBC-50% e RBC-90% apresentaram uma redução de emissões de substâncias tóxicas de 42% e 82%, respectivamente, comparados com o agregado de argila pura nas três categorias de ecotoxicidade. Da mesma forma, no cenário III (Parnamirim/RN), houve uma redução de 34% (RBC-50%) e 64% (RBC-90%).

Os impactos de ecotoxicidade terrestre, marinha e em água doce também foram apresentados para cada processo de produção e estão apresentados nos gráficos a seguir.

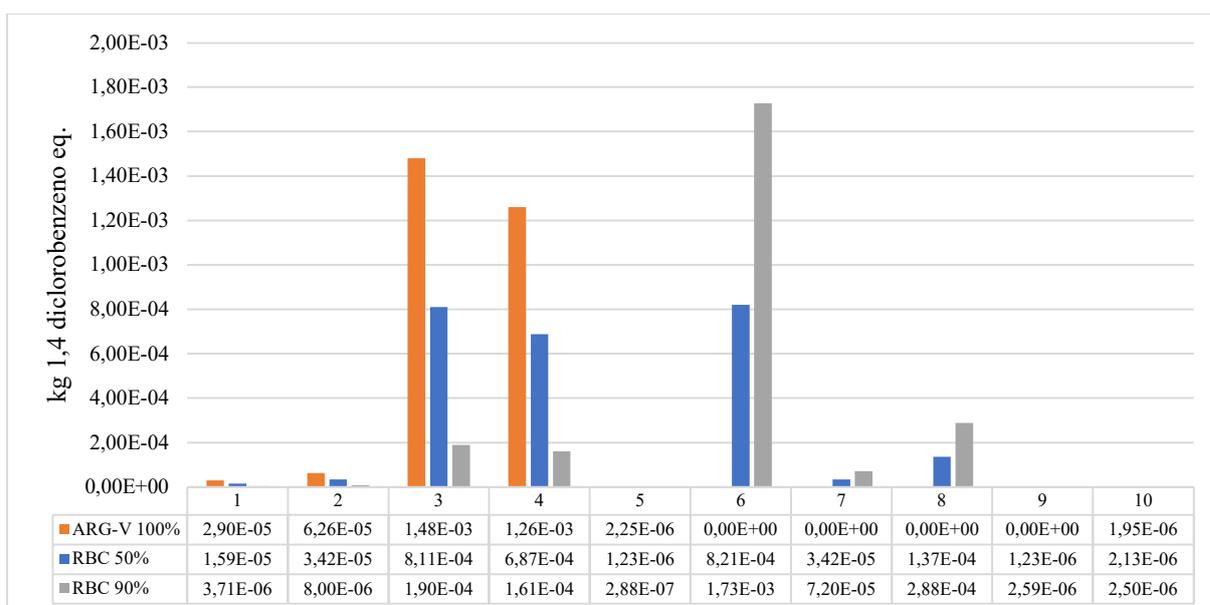
Gráfico 22 – Potencial de ecotoxicidade terrestre por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

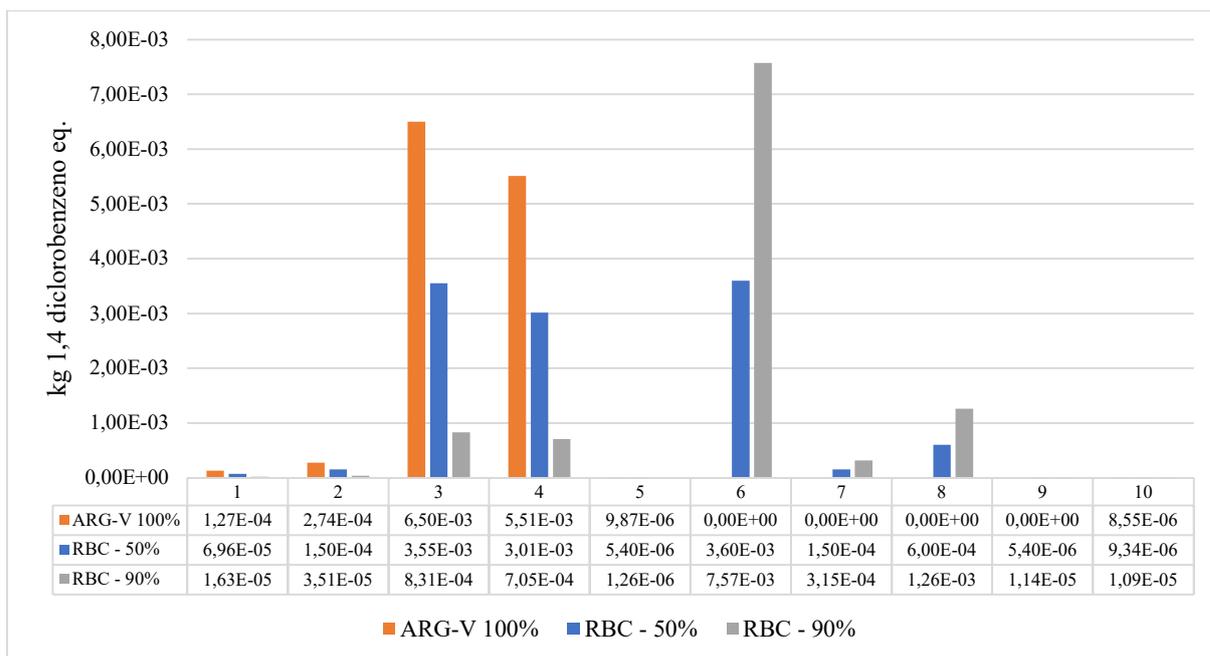
Gráfico 23 – Potencial de ecotoxicidade marinha por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

Gráfico 24 – Potencial de ecotoxicidade em água doce por etapa produtiva



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1 = extração da argila; 2 = transporte da argila (cenário I); 3 = transporte da argila (cenário II); 4 = transporte da argila (cenário III); 5 = beneficiamento da argila; 6 = transporte do RBC (cenário I); 7 = transporte do RBC (cenário II); 8 = transporte do RBC (cenário III); 9 = beneficiamento do RBC; 10 = alimentação.

O transporte da argila e RBC são as etapas mais impactantes no potencial de ecotoxicidade terrestre, marinho e de água doce. No solo, os impactos podem resultar na perda de nutrientes e redução da vegetação. As consequências podem afetar a produção agrícola e contribuir para o processo de desertificação do semiárido brasileiro. Nos ambientes aquáticos, a introdução de substâncias tóxicas pode provocar alterações no crescimento dos organismos e na diversidade das espécies, distúrbios no metabolismo, como também desencadear processos de bioacumulação.

Na Tabela 15 pode-se observar a compilação dos resultados dos impactos ambientais analisados na produção de 1 tonelada de agregados leves para as composições ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90% nos diferentes cenários.

Tabela 15 – Impactos ambientais da produção de 1 tonelada de agregados leves

Categorias de impactos ambientais	Unidade	Cenário I (Produção em Itajaí/RN)			Cenário II (Produção em Goianinha/RN)			Cenário III (Produção em Parnamirim/RN)		
		ARG-V 100%	RBC-50%	RBC-90%	ARG-V 100%	RBC-50%	RBC-90%	ARG-V 100%	RBC-50%	RBC-90%
Acidificação	kg SO ₂ eq.	8,24E-04	7,50E-03	1,49E-02	1,30E-02	7,41E-03	2,32E-03	1,11E-02	7,24E-03	3,92E-03
Eutrofização	kg NOx eq.	1,41E-03	1,29E-02	2,56E-02	2,23E-02	1,27E-02	3,97E-03	1,89E-02	1,24E-02	6,72E-03
Aquecimento global	kg CO ₂ eq.	6,39E+01	8,16E+01	1,06E+02	8,20E+01	8,15E+01	8,75E+01	7,91E+01	8,12E+01	8,99E+01
Toxicidade humana	kg 1,4-DCB eq.	1,41E-03	1,29E-02	2,56E-02	2,23E-02	1,27E-02	3,97E-03	1,89E-02	1,24E-02	6,72E-03
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq.	4,24E-07	3,88E-06	7,73E-06	6,71E-06	3,83E-06	1,20E-06	5,72E-06	3,74E-06	2,03E-06
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg C ₂ H ₄ eq.	2,75E-03	2,51E-02	5,00E-02	4,34E-02	2,48E-02	7,76E-03	3,70E-02	2,42E-02	1,31E-02
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB eq.	4,81E-05	4,39E-04	8,75E-04	7,57E-04	4,34E-04	1,36E-04	6,47E-04	4,24E-04	2,30E-04
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB eq.	9,58E-05	8,76E-04	1,74E-03	1,51E-03	8,65E-04	2,71E-04	1,29E-03	8,45E-04	4,58E-04
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB eq.	4,20E-04	3,84E-03	7,65E-03	6,65E-03	3,79E-03	1,19E-03	5,66E-03	3,70E-03	2,01E-03

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1,4-DCB – 1,4 diclorobenzeno

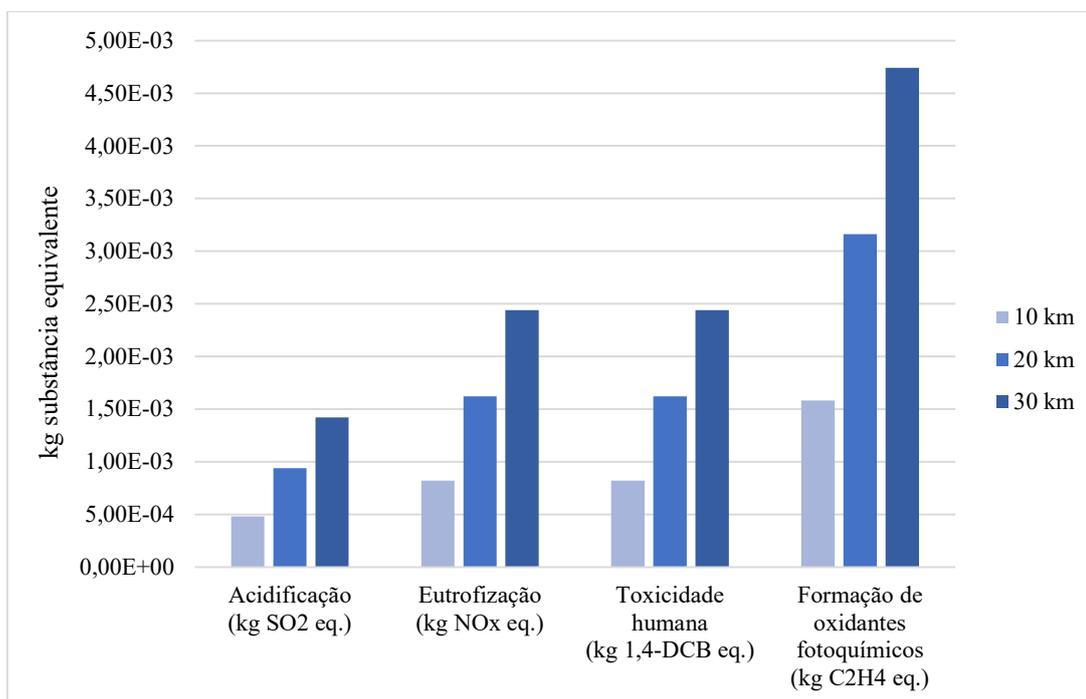
6.8 Considerações sobre a AICV

- As duas composições de agregado com uso de RBC apresentaram impactos ambientais menores (exceto na categoria de aquecimento global) em relação à composição de argila pura nos cenários em que a localização da fábrica está próxima ao local de obtenção do resíduo.
- A composição RBC-50% manteve valores constantes para todas as categorias de impactos ambientais nos três cenários. A composição RBC-90% alcançou mais benefícios em relação aos impactos ambientais no cenário II (Goianinha/RN) e III (Parnamirim/RN).
- O transporte do RBC foi um dos principais contribuintes para os valores elevados no Cenário I para a composição RBC-90%. A produção dos agregados pode não ser sustentável, se as distâncias de transporte das matérias-primas forem muito grandes.
- Os processos com consumo de combustível fóssil (diesel) influenciam significativamente nas categorias de impacto ambientais e os resultados são muito sensíveis a distância de transporte. Além disso, o diesel é o principal responsável pelos impactos negativos na toxicidade humana.
- O dióxido de carbono (CO₂), principal gás de efeito estufa, é responsável por 98,1% das emissões atmosféricas durante as etapas de transporte. As emissões atmosféricas restantes (1,9%) incluem monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado e hidrocarbonetos não-metano.
- O cenário II (produção em Goianinha/RN) apresentou-se ambientalmente como o mais favorável para as duas composições com uso de resíduos, devido à proximidade da matéria-prima. Destaca-se que apesar de não haver realizado simulação, existe a possibilidade de encontrar jazidas de argila em regiões próximas a cada cenário, o que diminuiria os impactos ambientais relacionados ao transporte da argila até o local.
- O transporte do resíduo até o local da fábrica influenciou significativamente em todas as categorias de impacto. Resultados semelhantes foram obtidos por Cuenca-Moyano *et al.* (2018).
- A etapa da queima possui destaque na categoria de aquecimento global. Os valores elevados de emissões de CO₂ estão associados, principalmente, à produção de energia elétrica, devido à alta potência dos equipamentos e seu elevado tempo de uso, e à queima da biomassa.

6.9 Simulação dos impactos ambientais do transporte da biomassa para queima

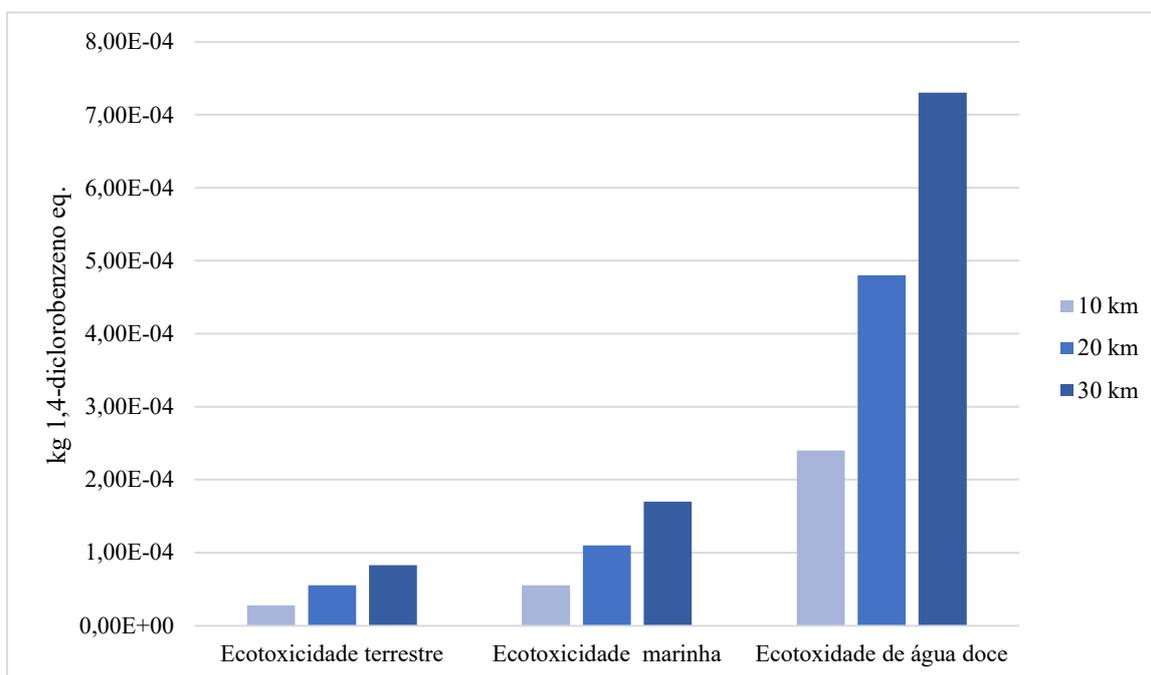
A quantificação dos impactos ambientais associadas ao transporte da biomassa para combustível na etapa de queima dos agregados foi realizada através de uma simulação de possíveis locais para manejo da lenha da algaroba. A quantidade de lenha considerada foi 1 tonelada de matéria seca, valor médio necessário para a queima dos agregados ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%. Considerou-se o transporte realizado por caminhões caçamba trucados com capacidade de 12 m³ e com uso de óleo diesel como fonte energética. As distâncias de transporte consideradas nesta simulação foram 10, 20 e 30 quilômetros. A simulação também pode ser aplicada para a entrega de 1 tonelada do agregado leve até os consumidores finais nas respectivas distâncias. Os resultados dos impactos ambientais estão apresentados nos gráficos a seguir.

Gráfico 25 – Potencial de acidificação, eutrofização, toxicidade humana e formação de oxidantes fotoquímicos para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba



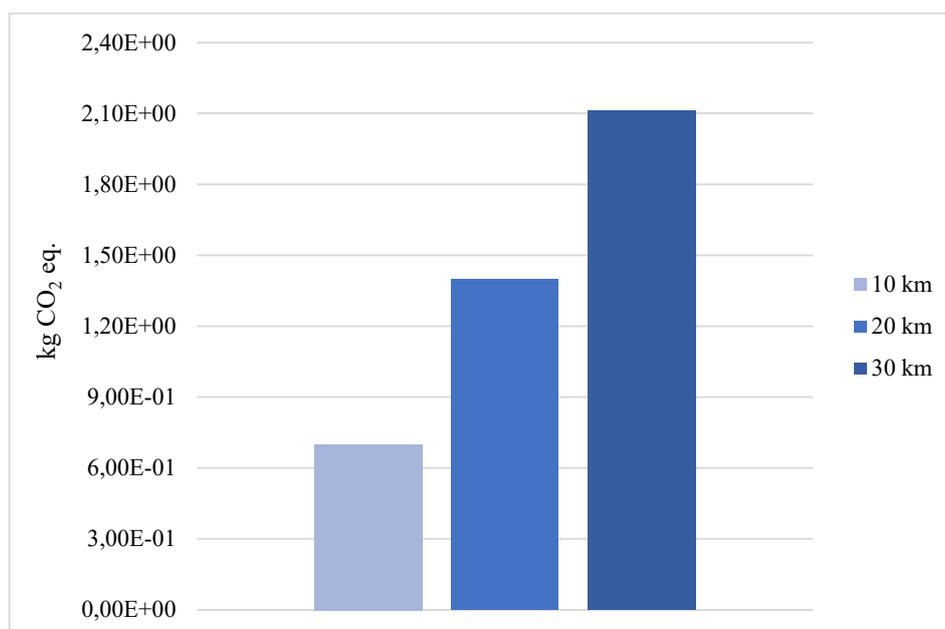
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 26 – Potencial de ecotoxicidade terrestre, marinha e de água doce para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba



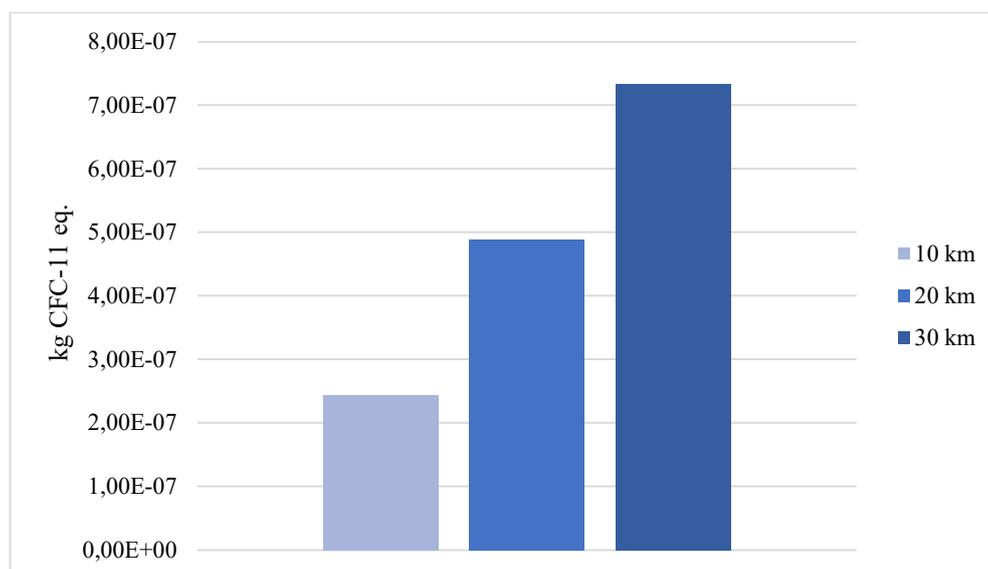
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 27 – Potencial de aquecimento global para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 28 – Potencial de depleção da camada de ozônio para o transporte de 1 tonelada de lenha da algaroba



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Com os resultados das categorias de impactos ambientais (Tabela 16), é possível perceber que ocorre um acréscimo linear das emissões conforme há um aumento das distâncias de transporte. As emissões de substâncias para atmosfera são influenciadas pelo consumo de óleo diesel, conseqüentemente há um aumento dos impactos ambientais com o aumento das distâncias.

Tabela 16 – Impactos ambientais do transporte de 1 tonelada da lenha da algaroba em diferentes distâncias

Categorias de impactos ambientais	Unidade	Distâncias		
		10 km	20 km	30 km
Acidificação	kg SO ₂ eq.	4,80E-04	9,40E-04	1,42E-03
Eutrofização	kg NO _x eq.	8,20E-04	1,62E-03	2,44E-03
Aquecimento global	kg CO ₂ eq.	7,00E-01	1,40E+00	2,11E+00
Toxicidade humana	kg 1,4-DCB eq.	8,20E-04	1,62E-03	2,44E-03
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq.	2,44E-07	4,89E-07	7,33E-07
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg C ₂ H ₄ eq.	1,58E-03	3,16E-03	4,74E-03
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB eq.	2,77E-05	5,53E-05	8,30E-05
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB eq.	5,52E-05	1,10E-04	1,70E-04
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB eq.	2,40E-04	4,80E-04	7,30E-04

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Dessa forma, o transporte de 1 tonelada da lenha na distância de 10 quilômetros resultou em menores impactos ambientais em comparação com as demais. A simulação para outras distâncias diferentes pode alterar os resultados, portanto devem ser analisadas os locais adequados para o manejo sustentável da lenha sob os pontos de vista econômico e ambiental.

Verificou-se que para o Cenário II (Goianinha/RN), localização mais favorável para os agregados com uso de resíduo, a inclusão dos impactos ambientais associadas ao transporte da lenha em 10 quilômetros resultou em um aumento em todas as categorias ambientais (exceto aquecimento global) correspondente a 3,7% para o agregado ARG-V 100%, 6,4% para o RBC-50% e 20,5% para o RBC-90%. Na categoria de aquecimento global, o aumento foi de 0,85% para o agregado ARG-V 100%, 0,86% para o RBC-50% e 0,80% para o RBC-90%.

6.10 Comparação com estudos anteriores

Os resultados da revisão sistemática retornaram diversos estudos com agregados naturais e reciclados de RCD, entretanto apenas dois artigos com agregados leves (INGRAO *et al.*, 2018; NAPOLANO *et al.*, 2016). Os artigos com agregados leves obtidos apresentaram unidade funcional e fronteira do sistema distintas do que foi adotado neste estudo. Sendo assim, para comparação, foram utilizados os artigos da revisão sistemática com unidade funcional e fronteira do sistema equivalentes para agregados naturais. Vale ressaltar que a comparação ideal seria para sistemas funcionais semelhantes, entretanto, não foi possível devido à falta de estudos com as mesmas condições.

Além disso, também foram tomados cuidados quanto aos resultados das categorias ambientais, pois, alguns estudos podem apresentar como unidade, substâncias equivalentes distintas a depender do método de impacto escolhido. Logo, a comparação foi realizada apenas para os impactos ambientais com unidade de substâncias compatíveis. Por apresentar os melhores resultados para as composições com uso de resíduo, o cenário II foi escolhido para comparação com os diferentes estudos de ACV, incluindo o transporte da biomassa para a distância de 10 quilômetros. A Tabela 17 mostra os resultados da comparação.

Em relação ao potencial de acidificação, as instalações de agregados naturais estudadas por Martinez-Arguellez *et al.* (2019), Cuenca-Moyano *et al.* (2018) e Faleschini *et al.* (2016) são responsáveis de forma global por maiores impactos do que as instalações de agregados leves aqui estudadas. Por outro lado, as emissões de CO₂ foram superiores aos autores citados. As emissões de CO₂ são influenciadas diretamente pelo transporte, devido ao uso de combustíveis

fósseis, e pela etapa da queima. Isso pode ser reduzido ao fazer uso de escolhas mais sustentáveis de energia, como por exemplo, o uso de energia fotovoltaica.

Quanto à toxicidade humana, os resultados obtidos foram menores em relação aos agregados naturais em comparação com os valores obtidos por Faleschini *et al.* (2016). Para a categoria de depleção da camada de ozônio, os resultados obtidos foram uma ordem de grandeza superior em relação aos mesmos estudos.

Para a categoria de formação de oxidantes fotoquímicos, os agregados leves artificiais apresentaram impactos ambientais maiores em comparação com os agregados naturais dos estudos de Cuenca-Moyano *et al.* (2018) e Faleschini *et al.* (2016). A ACV pode levar em consideração indicadores e instalações específicas de cada local o que pode gerar divergências nas comparações globais com outros estudos.

Tabela 17 – Comparação dos resultados com estudos anteriores de ACV

Agregados	Impactos ambientais											
	Fonte	Método	Tipo	Acidificação	Eutrofização	Aquecimento global	Toxicidade humana	Depleção da camada de ozônio	Formação de oxidantes fotoquímicos	Ecotoxicidade terrestre	Ecotoxicidade marinha	Ecotoxicidade de água doce
				kg SO ₂ eq.	kg NOx eq.	kg CO ₂ eq.	kg 1,4-DCB eq.	kg CFC-11 eq.	kg C ₂ H ₄ eq.	kg 1,4-DCB eq.	kg 1,4-DCB eq.	kg 1,4-DCB eq.
Este estudo	CML 2001 (<i>non baselin e</i>)	ARG-V 100%	ARG-V 100%	1,35E-02	2,31E-02	8,27E+01	2,31E-02	6,96E-06	4,50E-02	7,84E-04	1,57E-03	6,89E-03
		RBC-50%	RBC-50%	7,89E-03	1,35E-02	8,22E+01	1,35E-02	4,08E-06	2,64E-02	4,62E-04	9,20E-04	4,03E-03
		RBC-90%	RBC-90%	2,80E-03	4,79E-03	8,82E+01	4,79E-03	1,44E-06	9,34E-03	1,63E-04	3,26E-04	1,43E-03
Martinez-Arguellez <i>et al</i> (2019)	Impacto 2002+	Agregados naturais graúdos	4,80E-01	-	3,56E+01	-	0,00E+00	-	-	-	-	
Cuenca- Moyano <i>et al</i> (2018)	LMC-IA e ILCD	Agregados naturais miúdos	1,59E-02	-	1,81E+00	-	1,35E-07	5,77E-04	-	-	-	
Faleschini <i>et al</i> (2016)	CML 2002	Agregados naturais (alta qualidade)	1,51E-02	-	2,42E+00	2,18E-01	3,22E-07	9,52E-04	-	-	-	
		Agregados naturais (baixa qualidade)	1,45E-02	-	2,34E+00	2,09E-01	3,21E-07	8,75E-04	-	-	-	

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: 1,4-DCB – 1,4 diclorobenzeno

7 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A fase de interpretação do ciclo de vida compreendeu as três etapas seguintes: identificação das questões significativas; avaliação do estudo através das verificações da completeza, sensibilidade e consistência; conclusões, limitações e recomendações (ABNT, 2009b).

7.1 Identificação das questões significativas

Os resultados do ICV foram estruturados para cada processo elementar do ciclo de vida e a relevância dos dados foi possível através da expressão da contribuição percentual. Os resultados obtidos foram apresentados em uma matriz bidimensional, na qual as entradas e saídas são as linhas e processos elementares são as colunas. O cenário II foi escolhido por apresentar os melhores resultados em especial para as composições com uso de resíduo. Nas Tabelas 18, 19 e 20 podem ser observados os resultados do processo de estruturação para as três composições dos agregados leves. Através das contribuições foi possível identificar os processos mais influentes para os resultados do ICV.

Nas três composições do agregado leve, ARG-V 100%, RBC-50% e RBC-90%, o processo de transporte da argila possui maior influência em termos de consumo do óleo diesel com valores entre 58 a 94% do consumo total do combustível. Além disso, o transporte de argila apresenta as maiores contribuições para emissões de monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, material particulado e hidrocarbonetos não metano. Em relação às emissões de dióxido de carbono, a etapa de queima é a principal contribuinte com 70,70% das emissões do gás para o agregado ARG-V 100%, 80,02% para o RBC-50% e 89,01% para o RBC-90%.

Quanto ao consumo de energia elétrica, o processo mais importante são a extrusão e peletização com aproximadamente 30% do consumo total, devido à alta potência dos equipamentos relacionados a essa etapa. Os processos de extração da argila, mistura e transporte da lenha possuem as maiores contribuições para o consumo de recursos naturais, devido ao consumo de argila vermelha, água e biomassa, respectivamente.

Tabela 18 – Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV nos processos elementares da produção do agregado RBC-50% no cenário II

Entradas/saídas do ICV	RBC-50% - Cenário II - Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV												
	Extração da argila	Transporte da argila	Beneficiamento da argila	Transporte do RBC	Beneficiamento do RBC	Transporte da lenha	Alimentação	Mistura	Laminação	Extrusão e peletização	Queima	Armazenagem e ensacamento	Total
Argila (ton)	100,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%
RBC (ton)	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	100%
Água (m³)	-	-	-	-	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	100%
Polietileno - PEAD (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00%	100%
Óleo diesel (L)	1,73%	88,07%	0,13%	3,72%	0,13%	5,99%	0,23%	-	-	-	-	-	100%
Energia elétrica (kWh)	-	-	9,75%	-	9,75%	-	4,52%	11,53%	11,53%	30,07%	20,05%	2,81%	100%
Biomassa (tMS)	-	-	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	-	-	100%
Dióxido de carbono, CO ₂ (kg)	0,25%	12,56%	0,72%	0,53%	0,72%	0,85%	0,36%	0,82%	0,82%	2,15%	80,02%	0,20%	100%
Monóxido de carbono, CO (g)	1,73%	88,07%	0,13%	3,72%	0,13%	5,99%	0,23%	-	-	-	-	-	100%
Óxido de nitrogênio, NO _x (g)	1,73%	88,07%	0,13%	3,72%	0,13%	5,99%	0,23%	-	-	-	-	-	100%
Material Particulado (g)	1,73%	88,07%	0,13%	3,72%	0,13%	5,99%	0,23%	-	-	-	-	-	100%
Hidrocarbonetos não metano, NMHC (g)	1,73%	88,07%	0,13%	3,72%	0,13%	5,99%	0,23%	-	-	-	-	-	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: tMS = tonelada de matéria seca.

Tabela 19 – Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV nos processos elementares da produção do agregado RBC-90% no cenário II

Entradas/saídas do ICV	RBC-90% - Cenário II - Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV												
	Extração da argila	Transporte da argila	Beneficiamento da argila	Transporte do RBC	Beneficiamento do RBC	Transporte da lenha	Alimentação	Mistura	Laminação	Extrusão e peletização	Queima	Armazenagem e ensacamento	Total
Argila (ton)	100,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%
RBC (ton)	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	100%
Água (m³)	-	-	-	-	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	100%
Polietileno - PEAD (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00%	100%
Óleo diesel (L)	1,14%	58,18%	0,09%	22,09%	0,80%	16,93%	0,77%	-	-	-	-	-	100%
Energia elétrica (kWh)	-	-	1,93%	-	17,35%	-	4,47%	11,64%	11,64%	30,36%	20,24%	2,37%	100%
Biomassa (tMS)	-	-	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	-	-	100%
Dióxido de carbono, CO ₂ (kg)	0,05%	2,74%	0,16%	1,04%	1,40%	0,80%	0,39%	0,92%	0,92%	2,39%	89,01%	0,19%	100%
Monóxido de carbono, CO (g)	1,14%	58,18%	0,09%	22,09%	0,80%	16,93%	0,77%	-	-	-	-	-	100%
Óxido de nitrogênio, NO _x (g)	1,14%	58,18%	0,09%	22,09%	0,80%	16,93%	0,77%	-	-	-	-	-	100%
Material Particulado (g)	1,14%	58,18%	0,09%	22,09%	0,80%	16,93%	0,77%	-	-	-	-	-	100%
Hidrocarbonetos não metano, NMHC (g)	1,14%	58,18%	0,09%	22,09%	0,80%	16,93%	0,77%	-	-	-	-	-	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: tMS = tonelada de matéria seca.

Tabela 20 – Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV nos processos elementares da produção do agregado ARG-V 100% no cenário II

Entradas/saídas do ICV	ARG-V 100% - Cenário II - Contribuição percentual das entradas e saídas do ICV												
	Extração da argila	Transporte da argila	Beneficiamento da argila	Transporte do RBC	Beneficiamento do RBC	Transporte da lenha	Alimentação	Mistura	Laminação	Extrusão e peletização	Queima	Armazenagem e ensacamento	Total
Argila (ton)	100,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%
RBC (ton)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Água (m³)	-	-	-	-	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	100%
Poliétileno - PEAD (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00%	100%
Óleo diesel (L)	1,85%	94,37%	0,14%	-	-	3,51%	0,12%	-	-	-	-	-	100%
Energia elétrica (kWh)	-	-	19,84%	-	-	-	4,61%	11,41%	11,41%	29,76%	19,84%	3,13%	100%
Biomassa (tMS)	-	-	-	-	-	100,00%	-	-	-	-	-	-	100%
Dióxido de carbono, CO ₂ (kg)	0,45%	22,82%	1,30%	-	-	0,85%	0,32%	0,73%	0,73%	1,90%	70,70%	0,20%	100%
Monóxido de carbono, CO (g)	1,85%	94,37%	0,14%	-	-	3,51%	0,12%	-	-	-	-	-	100%
Óxido de nitrogênio, NO _x (g)	1,85%	94,37%	0,14%	-	-	3,51%	0,12%	-	-	-	-	-	100%
Material Particulado (g)	1,85%	94,37%	0,14%	-	-	3,51%	0,12%	-	-	-	-	-	100%
Hidrocarbonetos não metano, NMHC (g)	1,85%	94,37%	0,14%	-	-	3,51%	0,12%	-	-	-	-	-	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: tMS = tonelada de matéria seca.

7.2 Avaliação do estudo

Os resultados da etapa de avaliação foram importantes para determinar a confiabilidade e estabilidade dos dados, estes foram obtidos através das verificações de completeza, sensibilidade e consistência.

7.2.1 Verificação de completeza

A Tabela 21 mostra os resultados da verificação de completeza em relação aos dados do inventário.

Tabela 21 – Verificação de completeza

Processo elementar	ARG-V 100%	Completo?	Ação requerida	RBC-50%	Completo?	Ação requerida	RBC-90%	Completo?	Ação requerida
Extração da argila	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Transporte da argila	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Beneficiamento da argila	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Transporte do RBC	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Beneficiamento do RBC	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Transporte da lenha	X	Não	Verificar	X	Não	Verificar	X	Não	Verificar
Alimentação	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Mistura	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Laminação	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Extrusão e peletização	X	Sim		X	Sim		X	Sim	
Queima	X	Sim		X	Sim		X	Sim	X
Armazenagem e ensacamento	X	Não	Verificar	X	Não	Verificar	X	Não	Verificar

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No processo elementar do transporte da lenha, o local de manejo da biomassa sustentável é desconhecido. É recomendável a implantação de um manejo sustentável da algaroba, isso requer uma avaliação mais detalhada para uma oferta sustentável e competitiva em cada cenário. Desse modo, as emissões decorrentes do transporte da lenha da algaroba até o possível local da fábrica foram contabilizadas em uma simulação separada. De igual forma, não é conhecido o local de obtenção dos sacos de embalagem e/ou *bigbags* no processo de armazenagem e ensacamento, tendo em vista a necessidade de uma análise mais detalhada de possíveis fornecedores em cada cenário de localização da fábrica.

7.2.2 Verificação da sensibilidade

A verificação da sensibilidade foi realizada em relação à diferença no consumo de óleo diesel na mudança da categoria do caminhão de transporte das matérias-primas. A diferença foi obtida para as categorias de caminhões médios e pesados estabelecidos pelo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários (BRASIL, 2011). Os resultados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Verificação de sensibilidade

Categoria	Consumo específico de óleo diesel (L_{diesel}/100km)
Caminhão médio	18,0
Caminhão pesado	31,5
Diferença	-13,5
Sensibilidade	75 %

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O consumo de óleo diesel do caminhão pesado é 75% maior que o consumo do caminhão médio, a diferença resulta em menor consumo de combustível fóssil e menor quantidade de emissões atmosféricas. A mudança de modelo do caminhão pode exercer grande influência no resultado do estudo. Também a opção por veículos mais novos com sistemas de tratamento de gases mais eficientes pode auxiliar do ponto de vista ambiental, pois a etapa de transporte é a maior contribuinte para as emissões atmosféricas, exceto para o dióxido de carbono, em que a queima foi o principal responsável.

7.2.3 Verificação da consistência

A verificação da consistência buscou determinar se os pressupostos, modelos e dados estão consistentes com o escopo da ACV. Os pressupostos utilizados são considerados consistentes, na medida em que o modelo industrial foi elaborado de acordo com as etapas previstas na produção dos agregados em escala laboratorial. Para isto foi realizada uma pesquisa com fornecedores locais e estrangeiros dos equipamentos para porte industrial, considerando indicações, tecnologias e experiências dos fabricantes quanto ao funcionamento dos maquinários. Também foi considerada a realidade da região, verificando os processos empregados nas empresas de materiais cerâmicos.

O modelo de impacto CML 2001 é reconhecido e utilizado pela comunidade científica e os fatores de caracterização eram disponíveis no software OpenLCA 1.10. Entretanto, a abrangência geográfica dos fatores de caracterização foi desenvolvida para regiões da Europa. Ainda há necessidade de modelos mais representativos e fatores específicos para a realidade brasileira.

As fontes de dados são consideradas consistentes. Os dados relevantes foram obtidos por fontes primárias, tais como consumo do óleo diesel na extração da argila, quantificação das entradas e saídas das matérias-primas nos processos, distâncias de transporte, tipo de veículo, especificação de equipamentos industriais. Esgotadas as tentativas, foram utilizadas fontes secundárias nacionais confiáveis para quantificação das emissões atmosféricas. Nesse sentido, não foram realizadas consultas a bancos de dados internacionais.

7.3 Conclusões, limitações e recomendações

A ACV buscou mensurar os impactos relativos as etapas de produção de agregados leves com uso de resíduo industrial (RBC) e argila do Nordeste brasileiro. Para isso, foi necessário a elaboração de um modelo de fábrica hipotético para ampliar a atual produção em escala laboratorial para uma produção em escala industrial. Os dados da produção dos agregados leves foram coletados diretamente em laboratório, respeitando os limites estabelecidos no escopo do estudo. As fontes de dados foram primárias e fontes secundárias nacionais, procurou-se apresentar os dados de maneira clara, transparente e em conformidade com a realidade local.

Quanto à extração das matérias-primas, os dados foram coletados diretamente *in loco*, considerando a regionalidade do modo de operação de uma empresa ceramista do município Açu/RN. O modelo industrial foi concebido contemplando as etapas de produção em laboratório e as tecnologias locais de produção de materiais cerâmicos. Os dados dos equipamentos industriais foram coletados diretamente com fornecedores dos maquinários. Entretanto, o modelo de fábrica não foi verificado com outras empresas produtoras de argila expandida, pois muitas informações necessárias para tal comparação são mantidos em confidencialidade pelos produtores.

As questões significativas identificadas estão relacionadas à etapa de transporte das matérias-primas e queima dos agregados leves. As limitações presentes no levantamento de dados do inventário, estão associadas a não inclusão do transporte da embalagem do produto. Essas informações gerariam resultados mais precisos e completos. Entretanto, essa limitação não invalida o estudo, pois impactos adicionais teriam implicações uniformes em cada

composição do agregado leve e não afetariam de forma global os resultados obtidos. Além dessas limitações, devido a unicidade do sistema de produto analisado, em especial quanto à unidade funcional, não foram realizadas comparações com outros estudos de sistemas de produtos semelhantes, visto que não foram encontrados na literatura.

Com base nos resultados obtidos, é possível fazer recomendações ao processo produtivo dos agregados leves, vide Quadro 5. As recomendações aqui propostas visam a sustentabilidade do processo, a fim de mitigar os principais impactos ambientais decorrentes da produção dos agregados leves. Vale ressaltar que informações técnicas sobre os equipamentos (especificações de óleo lubrificante e periodicidade de calibração, limpeza e manutenção, por exemplo) podem ser obtidas junto aos manuais que acompanham os equipamentos a serem adquiridos.

Quadro 5 – Recomendações ao processo produtivo de agregado leves

Processo	Recomendações
Extração da argila vermelha	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizar a extração apenas em áreas autorizadas com licença ambiental; ▪ Efetuar o monitoramento e controle das áreas exploradas através de relatórios técnicos e mapas descritivos, impedindo a formação de processos erosivos acelerados; ▪ Realizar a manutenção preventiva nas escavadeiras para evitar vazamentos de óleo combustível, graxas e lubrificantes; ▪ Efetuar o controle da poluição, evitando o lançamento de gases e partículas sólidas durante o uso dos equipamentos; ▪ Comunicar ao órgão ambiental local em caso de contaminação do lençol freático no local da extração; ▪ Elaborar um plano de recuperação das áreas degradadas.
Transporte das matérias-primas (argila vermelha e RBC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizar caminhões em bom estado, de preferência novos e com boa eficiência energética; ▪ Efetuar o controle do nível de poluentes e utilizar sistemas de tratamento dos gases de escape do veículo; ▪ Realizar o controle da velocidade dos caminhões; ▪ Verificar possíveis alterações no consumo de óleo combustível; ▪ Investigar a ocorrência de perdas de material ao longo do transporte; ▪ Efetuar a manutenção preventiva dos veículos.
Beneficiamento das matérias-primas e alimentação da produção	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizar a limpeza periódica dos equipamentos a fim de evitar acúmulo de resíduos de argila; ▪ Efetuar a manutenção periódica conforme instruções do fabricante; ▪ Observar possíveis alterações no consumo de óleo combustível da pá carregadeira; ▪ Manter os equipamentos em bom estado de conservação.

Quadro 5 – Recomendações ao processo produtivo de agregado leves (continuação)

Processo	Recomendações
Mistura	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manter a lubrificação adequada dos rolamentos e caixas de engrenagens; ▪ Realizar a limpeza das palhetas do misturador sempre que necessário; ▪ Cumprir a dosagem adequada da água a fim de evitar perdas da massa úmida; ▪ Efetuar a manutenção preventiva.
Laminação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verificar a ocorrência de alterações no funcionamento e rotação dos cilindros; ▪ Realizar a manutenção das peças conforme instruções do fabricante; ▪ Manter a lubrificação adequada dos rolamentos.
Extrusão e peletização	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manter os equipamentos em bom estado de conservação para evitar desperdícios de energia; ▪ Realizar a limpeza periódica da extrusora; ▪ Manter a lubrificação adequada dos rolamentos.
Queima	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adotar procedimentos de controle e operação ▪ Optar por fontes energéticas sustentáveis e, em caso, do uso de lenha da algaroba realizar um plano de manejo florestal sustentável e não utilizar algarobais dentro de áreas de preservação permanente; ▪ Realizar a limpeza periódica dos equipamentos, em especial, do lavador de gás; ▪ Verificar e manter os níveis adequados de eficiência energética do forno rotativo; ▪ Controlar as emissões atmosféricas e utilizar filtros para reter gases poluentes não retidos pelo lavador de gás; ▪ Reaproveitar a energia térmica residual da carga após o processamento no forno; ▪ Verificar a integridade do material refratário de revestimento do forno rotativo; ▪ Manter a inclinação e velocidade de rotação do forno rotativo conforme a taxa de produção indicada pelo fabricante; ▪ Instalar termopares para efetuar o controle da temperatura; ▪ Efetuar a manutenção periódica conforme instruções do fabricante.
Armazenagem e ensacamento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verificar a qualidade do produto através de ensaios normatizados e, em caso de não conformidade, os lotes reprovados devem ser identificados e separados; ▪ Manter os silos de armazenagem limpos e secos para evitar qualquer tipo de contaminação do produto ou risco de entupimentos; ▪ Realizar a manutenção preventiva dos equipamentos.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ACV de agregados leves produzidos com resíduo industrial (RBC) e argila vermelha do Nordeste brasileiro buscou mensurar os impactos ambientais decorrentes da sua produção numa abordagem *cradle-to-gate*. Para isso, foi elaborado uma proposta de produção dos agregados com especificação das etapas e equipamentos comumente usados em indústrias cerâmicas, com possibilidade de ser adaptada a diversas regiões do Brasil. A partir da especificação dos processos presentes na planta de produção, foi possível realizar a avaliação ambiental de três composições dos agregados leves.

A avaliação dos impactos ambientais de todas as etapas propostas ao processo produtivo foi obtida mediante a aplicação dos indicadores do método CML 2001 *non baseline*. O levantamento do banco de dados do inventário foi obtido com uso de fontes primárias e fontes secundárias nacionais, sendo quantificadas as entradas e saídas de cada processo.

O uso do RBC na composição dos agregados leves possibilitou a redução de até 87,21% da argila vermelha como recurso natural. No cenário em que a fábrica é instalada nas proximidades do local de obtenção de resíduo, o agregado de argila pura (ARG-V 100%) apresentou os maiores impactos ambientais em todas as categorias, exceto o aquecimento global, em comparação com os agregados com composição uso de resíduos (RBC-50% e RBC-90%).

Os impactos ambientais relacionados ao transporte da matéria-prima podem ser reduzidos, caso sejam considerados outros fatores locais, como jazidas de argila mais próximas ao local da fábrica. O cenário II (produção em Goianinha/RN) apresentou-se ambientalmente como o mais favorável para as duas composições com uso de resíduos, devido à proximidade ao local de coleta do RBC. Destaca-se que o cenário ideal deve ser obtido através da realização de um estudo de localização completo antes da realização da ACV, levando em consideração outros fatores como custos de transporte, mão de obra, vias de acesso ao local da fábrica.

Na categoria de aquecimento global, o processo de queima dos agregados possui maior importância, principalmente, devido as altas emissões de CO₂ associadas a queima do combustível. As etapas de transporte influenciaram significativamente em todas as categorias de impacto devido ao uso de combustível fóssil (diesel). Os resultados são muito sensíveis as distâncias de transporte.

Considera-se a ACV uma importante ferramenta para avaliação ambiental de novos produtos. Usualmente, os estudos apontam que o uso de resíduos é uma importante solução do

ponto de vista ambiental, mas não foram encontrados trabalhos que pudessem mensurar os impactos ambientais da produção em escala industrial de agregados leves com uso do RBC. Portanto, espera-se com este trabalho auxiliar a realização de outros estudos de ACV e contribuir na complementação de bancos de dados nacionais, bem como incentivar a produção de agregados leves mais sustentáveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Novos estudos de ACV aplicados em agregados leves com uso de RBC em outras unidades funcionais e com incorporação de outros tipos de resíduos e subprodutos industriais.
- Inclusão dos estágios de transporte do produto aos consumidores e disposição final na avaliação do ciclo de vida de agregados leves.
- Análise comparativa com a produção de argila expandida comercial.
- Comparar os impactos ambientais do uso de diferentes combustíveis no processo de queima dos agregados leves.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14040: **Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida, princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.
- _____. NBR 14044: **Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida, requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo: Blucher, 2011.
- ASLANI, F.; MA, G., YIM WAN, D. L.; MUSELIN, G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 553–566, 2019.
- ASSUNÇÃO, C. C. **Avaliação do ciclo de vida de argamassas com substituição parcial de cimento portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2020. 97f.
- AZEVEDO, F. F.; GALINDO, L. S. A espacialidade da indústria no Rio Grande do Norte (Brasil) no contexto da reestruturação produtiva. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v.42, n. 2, p. 147-168, 2016.
- BARNAT-HUNEK, D.; GÓRA, J.; ANDRZEJUK, W.; LAGÓD, G. The Microstructure-Mechanical Properties of Hybrid Fibres-Reinforced Self- compacting Lightweight Concrete with Perlite Aggregate. **Materials**, v. 11, p. 1093, 2019.
- BARROS, M. V.; SALVADOR, R.; PIEKARSKI, C. M.; DE FRANCISCO, A. C. Mapping of main research lines concerning life cycle studies on packaging systems in Brazil and in the world. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 1429–1443, 2019.
- BENTO, R. C. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da avaliação do ciclo de vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade de São Paulo, 2016. 216 p.
- BEZERRA, R. M. de F. **Potencial utilitário da caatinga na microrregião do Vale do Açu-RN: um paralelo entre o setor ceramista e os assentamentos rurais como subsídio à conservação**. 2017. 136f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- BIERNACKI, P.; WALDORF, D. Snowball Sampling: problems and techniques of chain referral sampling. **Sociological Methods & Research**, v. 10, n. 2, p. 141–163, 1981.
- BIZCOCHO, N.; LLATAS, C. Inclusion of prevention scenarios in LCA of construction waste management. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 468–484, 2019.

BRASIL. Resolução nº 04/2010. Dispõe sobre a Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida. Conselho Nacional de Metrologia, Normalização, e Qualidade Industrial – CONMETRO, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC, 2010.

_____. Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012. Dispõe sobre diretrizes e normas regulamentadoras de pesquisas envolvendo seres humanos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 13 jun. 2013.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Brasília, 2011.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Biomassa para energia no Nordeste: atualidades e perspectivas**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Brasília, DF: MMA, 2018.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2019**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2019.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 5. ed. Brasília: 2019. 71 p.

CHEHEBE, J. R. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, CNI, 2002. 120 p.

CIROTH, A. ICT for environment in life cycle applications openLCA: a new open source software for life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, p. 209, 2007.

CLARKE, J. L. **Structural lightweight aggregate concrete**, CRC Press, 2002.

CLEMENTE, A.; CONSENZA, CAN. Análise da localização de projetos. **Projetos empresariais e públicos**, v. 2, p. 119-143, 2002.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas**. Brasília. 2014. 111 p.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de Produção e Operações**. São Paulo: Atlas, 2013.

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

DI MARIA, A.; SALMAN, M.; DUBOIS, M.; VAN ACKER, K. Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 2091–2109, 2018.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Life cycle assessment: principles and practice**. Ohio, 2006.

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

EUROPEAN COMMISSION. **ILCD Handbook**: international reference life cycle data system: general guide for life cycle assessment. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010, 417 p.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). **Experiências e reflexões sobre a gestão do ciclo de vida de produtos nas empresas brasileiras: Ciclos 2015 e 2016**. Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces), São Paulo, 2017.

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

GAN, V. J. L.; CHENG, J. C. P.; LO, I. M. C. Integrating life cycle assessment and multi-objective optimization for economical and environmentally sustainable supply of aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 76–85, 2015.

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**, p. 1–10, 2017.

GREENDELTA. **LCA data**. Disponível em: <<http://www.openlca.org/lca-data/>>. Acesso em: 22 de abril de 2020.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; AZEZ, O. A.; ÖZ, H. Ö. Effect of nano silica on the workability of self-compacting concretes having untreated and surface treated lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 371–380, 2016.

HARTKE, R. F. **Modelagem e simulação térmica de um forno rotativo para a produção de agregado de argila calcinada**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

HORNE, R.; GRANT, T.; VERGHESE, K. **Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects**. CSIRO Publishing, 2009, 192p.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; LO, I. M. C.; CHENG, J. C. P. Comparative Environmental Evaluation of Aggregate Production from Recycled Waste Materials and Virgin Sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 109, p. 67–77, 2016.

IBICT. **Manual do Sistema ILCD**: Guia Geral para Avaliações de Ciclo de Vida. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010, 317p.

INGRAO, C.; SELVAGGI, R.; VALENTI, F.; MATARAZZO, A.; PECORINO, B.; ARCIDIACONO, C. Life cycle assessment of expanded clay granulate production using different fuels. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 398–409, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva, Switzerland, 2006.

KURDA, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 139, p. 407–417, 2019.

LEITE, F. R. **O potencial uso de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais como matéria-prima em argamassas e sua avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019. 117 f.

MADEIRA, J. G. S. **Avaliação do ciclo de vida energético e desempenho da envoltória mediante ações de Retrofit em edificação pública escolar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2019. 195 f.

MARTINEZ-ARGUELLES, G.; ACOSTA, M. P.; DUGARTE, M.; FUENTES, L. Life cycle assessment of natural and recycled concrete aggregate production for road pavements applications in the northern region of Colombia: case study. **Transportation Research Record**, 2673 (5), p. 397–406, 2019.

MATTAR, F. N. **Pesquisa de Marketing: metodologia e planejamento**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2005.

MELLO, R. Z. **Avaliação do Ciclo de Vida da Utilização do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais em Materiais de Construção Civil à Base de Cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2018. 160 f.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2016.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. Ed. São Paulo: IBRACON. 2014.

MINKOV, N.; LEHMANN, A.; WINTER, L.; FINKBEINER, M. Characterization of environmental labels beyond the criteria of ISO 14020 series. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 840–855, 2020.

MOHAMMADI, J.; SOUTH, W. Life cycle assessment (LCA) of benchmark concrete products in Australia. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 1588–1608, 2017.

MORAU, D.; RABARISON, T.; RAKOTONDRAMIANANA, H. Life Cycle Analysis of Green Roof Implemented in a Global South Low-Income Country. **British Journal of Environment and Climate Change**. v.7, p. 43–55, 2017.

MORENO-MAROTO, J. M; GONZÁLES-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; RODRÍGUEZ, L.; ACOSTA, A. Development of lightweight aggregates from stone cutting sludge, plastic wastes and sepiolite rejections for agricultural and environmental purposes. **Journal of Environmental Management**, v. 200, p. 229-242, 2017.

NAPOLANO, L.; MENNA, C.; GRAZIANO, S. F.; ASPRONE, D.; D'AMORE, M.; GENNARO, R.; DONDI, M. Environmental life cycle assessment of lightweight concrete to support recycled materials selection for sustainable design. **Construction and Building Materials**, 119, 370–384, 2016.

NAZÁRIO, L. **Caracterização e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da produção de telhas cerâmicas no município de Parelhas/RN**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019. 171f.

NILSSON-LINDÉN, H.; BAUMANN, H.; ROSÉN, M.; DIEDRICH, A. Organizing life cycle management in practice: challenges of a multinational manufacturing corporation. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 1368–1382, 2018.

OLIVEIRA, S. B.; MAHLER, C. F. **Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos**: uma introdução. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2018.

PARK, W.; KIM, T.; ROH, S.; KIM, R. Analysis of Life Cycle Environmental Impact of Recycled Aggregate. **Applied Sciences**, v. 9, n. 1021, 2019.

PEDROSO, G. M. **Avaliação de ciclo de vida energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015. 226 f.

PEREIRA, J. C. D.; LIMA, P. C. F. Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia. **Brazilian Journal of Forestry Research**, n. 45, p. 99-106, 2002.

PÉREZ, J.; LUMBRERAS, J.; RODRÍGUEZ, E. Life cycle assessment as a decision-making tool for the design of urban solid waste pre-collection and collection/transport systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, 2020.

PIVA, G. O. **Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ em edificação histórica de origem portuguesa e contemporânea**. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2019. 142 f.

RIGON, M. R. **Avaliação ambiental do uso da casca de arroz como biomassa para fins energéticos e do coproduto cinza aplicado ao concreto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2015. 118 f.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; MEJÍA-ARCILA, J. M.; GUTIÉRREZ, R. M. Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 242–252, 2017.

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.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2015. 345 f.

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

ROSSI, E. **Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso.** Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. 150 f.

SANTIS, B. C.; ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da influência de agregados leves de argila calcinada no desempenho de concretos estruturais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 21-32, 2014.

SANTOS, J.; BRESSI, S.; CERZO, V.; LO PRESTI, D.; DAUVERGNE, M. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, p. 283–297, 2019.

SANTOS, L. M. M. dos. **Avaliação ambiental de processos industriais.** São Paulo: Oficina de textos, 2011. 4 ed.

SARTORI, T. G. **Medidas de retrofit em edifícios típicos existentes de um bairro: desempenho e avaliação do ciclo de vida energético.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2018. 177 f.

SELHORST, R. da R.; SILVA, C. A. da; NOBRE, T. H. D. B. ACV no Processo de Design: Análise dos Impactos Ambientais da Fabricação de Argamassa na Região Nordeste do Brasil. **MIX Sustentável**, v. 5, n. 4, 2019.

SILVA, N. R.; GUERRA, L. C. B.; FILGUEIRA, J. M. Comércio internacional e desenvolvimento sócio-econômico: o polo industrial de Goianinha e a utilização de gás natural. **EmpíricaBR - Revista Brasileira de Gestão, Negócio e Tecnologia da Informação**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 56-66, nov. 2017.

SOMBRIO, C. M. de O. **ACV de painéis de blocos cerâmicos e concreto armado: um exercício de aplicação do manual do ILCD.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015. 138 f.

SOUZA, M. M.; ANJOS, M. A. S.; SÁ, M. V. V. A.; SOUZA, N. S. L. Developing and classifying lightweight aggregates from sewage sludge and rice husk ash. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2020.

SOUZA, N. S. L. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduos industriais e matérias-primas locais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. 147f.

TANG, P; BROUWERS, H. J. H. The durability and environmental properties of self-compacting concrete incorporating cold bonded lightweight aggregates produced from combined industrial solid wastes. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 271–285, 2019.

UNEP. **Life cycle assessment: what it is and how to do it**. Paris, France, 1996.

UNEP; SETAC. **Life cycle management: a business guide to sustainability**. Paris, 2007. 51 p. Disponível em: <<http://www.unep.fr>>. Acessado em 06 mar. 2018.

VINHAL, L. D. **Estudo de indicadores ambientais de blocos cerâmicos com base em avaliação do ciclo de vida, considerando o contexto brasileiro**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2016. 137 f.

ZASTROW, P.; MOLINA-MORENO, F.; GARCÍA-SEGURA, T.; MARTÍ, J. V.; YEPES, V. Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: a parametric study. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1037–1048, 2017.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

Responsável: _____

Empresa: _____

Cargo: _____

Endereço: _____

Cidade: _____ Estado: _____

Telefone: _____ Email: _____

QUESTIONÁRIO DESTINADO A PRODUÇÃO DE 2019:
1 - ETAPA DE EXTRAÇÃO DA ARGILA
Perguntas gerais sobre a etapa de extração:
a) Qual o local da extração? _____
b) Qual a distância do local de extração até a cerâmica? _____
c) Qual quantidade de argila extraída mensalmente (m ³ /mês)? _____
d) Qual a frequência mensal de extração? _____
e) Existe algum tipo de resíduo gerado na extração? Se sim, qual a quantidade? _____ _____
f) Qual o número de funcionários que operam no local da extração da argila? _____
g) Qual o regime de trabalho dos funcionários (h/dia)? _____
h) Há algum método de recuperação da área de extração? _____ _____
i) Há alguma dificuldade encontrada na extração da argila? _____ _____
Sobre o equipamento utilizado para extração:
a) Qual o equipamento usado para extrair a argila? _____
b) Qual o seu modelo, marca e ano? _____
c) Qual a sua capacidade (m ³)? _____
d) Qual a sua potência (cv)? _____
e) Quantas vezes o equipamento é utilizado por mês para a extração de argila? Diariamente? _____
f) Qual o regime de trabalho (h/dia) do equipamento? _____
g) Qual o tipo de diesel utilizado? _____
h) Qual o consumo de diesel por mês (L/mês)? _____
i) Qual o custo (mil reais) aproximado do equipamento? _____
j) Qual o gasto anual (mil reais/ ano) aproximado da manutenção do equipamento? _____
Sugestões e comentários adicionais para a etapa de extração da argila:
a) Quais suas sugestões de melhorias para o processo de extração?

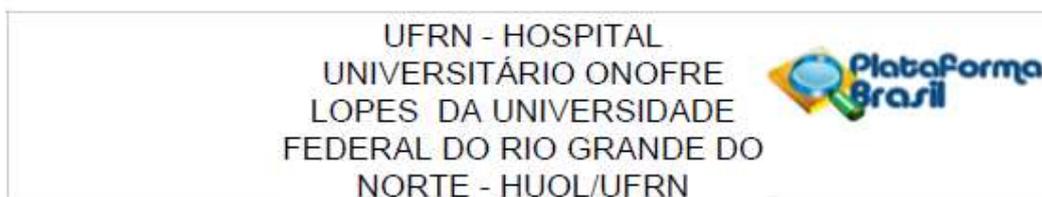
b) Comentários adicionais:
2 - ETAPA DE TRANSPORTE DA ARGILA
Perguntas gerais:
a) Quantos funcionários são necessários nesta etapa?
b) Quantas horas por dia os funcionários dedicam para a etapa de transporte do material?
c) Há alguma dificuldade encontrada no transporte da argila? _____
Perguntas sobre o equipamento:
a) Qual o equipamento usado para o transporte do local da extração de argila até o local da cerâmica?
b) Qual o seu modelo, marca e ano? _____
c) Qual a sua capacidade (m ³)? _____
d) Qual a sua potência (cv)? _____
e) Quantas vezes o equipamento é utilizado por mês para o transporte de argila? Diariamente?
f) Qual o regime de trabalho (h/dia) do equipamento?
g) Qual o tipo de diesel? _____
h) Qual o consumo de diesel por mês (L/mês)? _____
i) Quantas viagens são realizadas por dia? _____
j) Qual a distância aproximada das viagens (km) ? _____
k) Qual o volume transportado de argila? _____
l) Qual o custo (mil reais) aproximado do equipamento? _____
m) Qual o gasto anual aproximado da manutenção do equipamento (mil reais/ano)?
Sugestões e comentários adicionais:
a) Quais suas sugestões de melhorias para a etapa de transporte? _____ _____ _____ _____
b) Comentários adicionais: _____ _____ _____ _____

APÊNDICE B – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS LEVES EM ESCALA LABORATORIAL

INVENTÁRIO				RBC 50%		RBC 90%		
Processo principal	Tipo de fluxo		Fluxo	Quantidade	Un.	Quantidade	Un.	
Extração da argila	Entradas	Recursos naturais	Argila crua	1,30E+00	kg	3,06E-01	kg	
		Energia	Óleo diesel	1,58E-04	L	3,73E-05	L	
	Saídas	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	4,23E-04	kg	9,96E-05	kg	
			Monóxido de carbono (CO)	1,11E-03	g	2,61E-04	g	
			Óxidos de nitrogênio (NO _x)	4,07E-04	g	9,58E-05	g	
			Material particulado (MP)	3,94E-04	g	9,28E-05	g	
		Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	6,39E-03	g	1,51E-03	g		
Transporte da argila (extração até a empresa cerâmica)	Entradas	Energia	Óleo diesel	2,24E-04	L	5,28E-05	L	
		Saídas	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	5,99E-04	kg	1,41E-04	kg
	Monóxido de carbono (CO)			1,57E-03	g	3,70E-04	g	
	Óxidos de nitrogênio (NO _x)			5,76E-04	g	1,36E-04	g	
	Material particulado (MP)			5,58E-04	g	1,31E-04	g	
			Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	9,05E-03	g	2,13E-03	g	
Transporte da argila (empresa cerâmica até o laboratório)	Entradas	Energia	Gasolina	1,26E-01	L	2,96E-02	L	
		Saídas	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	2,85E-01	kg	6,71E-02	kg
	Monóxido de carbono (CO)			4,56E-01	g	1,07E-01	g	
	Óxidos de nitrogênio (NO _x)			4,14E-02	g	9,76E-03	g	
	Material particulado (MP)			1,52E-03	g	3,58E-04	g	
	Hidrocarbonetos não metano (NMHC)			4,42E-02	g	1,04E-02	g	
	Aldeídos (RCHO)			1,71E-02	g	4,03E-03	g	
			Metano (CH ₄)	1,52E-02	g	3,58E-03	g	
Secagem da argila	Entradas	Recursos naturais	Argila crua	1,30E+00	kg	3,06E-01	kg	
		Energia	Energia elétrica	1,92E+01	kWh	1,92E+01	kWh	
	Saídas	Emissões	Subproduto	Argila seca	1,06E+00	kg	2,51E-01	kg
			Água	Água evaporada (<i>water to air</i>)	2,33E-01	dm ³	5,49E-02	dm ³
				Dióxido de carbono (CO ₂)	1,69E+00	kg	1,69E+00	kg
Destorroamento da argila	Entradas	Subproduto	Argila seca	1,06E+00	kg	2,51E-01	kg	
	Saídas	Subproduto	Argila destorroada	1,06E+00	kg	2,51E-01	kg	
Peneiramento da argila	Entradas	Subproduto	Argila destorroada	1,06E+00	kg	2,51E-01	kg	
	Saídas	Subproduto	Argila peneirada	6,59E-01	kg	1,55E-01	kg	
Transporte do RBC (fábrica até o laboratório)	Entradas	Energia	Gasolina	5,61E-03	L	1,19E-02	L	
		Saídas	Emissões	Dióxido de carbono (CO ₂)	1,27E-02	kg	2,70E-02	kg
	Monóxido de carbono (CO)			2,04E-02	g	4,31E-02	g	
	Óxidos de nitrogênio (NO _x)			1,85E-03	g	3,92E-03	g	
	Material particulado (MP)			6,79E-05	g	1,44E-04	g	
	Hidrocarbonetos não metano (NMHC)			1,97E-03	g	4,18E-03	g	
			Aldeídos (RCHO)	7,65E-04	g	1,62E-03	g	
		Metano (CH ₄)	6,79E-04	g	1,44E-03	g		
Secagem do RBC	Entradas	Subproduto	RBC úmido	6,73E-01	kg	1,43E+00	kg	
		Energia	Energia elétrica	1,92E+01	kWh	1,92E+01	kWh	
	Saídas	Emissões	Subproduto	RBC seco	6,59E-01	kg	1,40E+00	kg
			Água	Água evaporada (<i>water to air</i>)	1,41E-02	dm ³	2,93E-02	dm ³
				Dióxido de carbono (CO ₂)	1,69E+00	kg	1,69E+00	kg
Moagem do RBC	Entradas	Subproduto	RBC seco	6,59E-01	kg	1,40E+00	kg	
		Energia	Energia elétrica	4,85E-02	kWh	1,03E-01	kWh	
	Saídas	Emissões	Subproduto	RBC moído	6,59E-01	kg	1,40E+00	kg
				Dióxido de carbono (CO ₂)	4,27E-03	kg	9,05E-03	kg
Preparação das misturas	Entradas	Subproduto	RBC moído	6,59E-01	kg	1,40E+00	kg	
		Subproduto	Água	7,38E-01	kg	1,20E+00	kg	
	Saídas	Subproduto	Mistura para agregados	2,06E+00	kg	2,75E+00	kg	
Peletização	Entradas	Subproduto	Mistura para agregados	2,06E+00	kg	2,75E+00	kg	
	Saídas	Subproduto	Agregados úmidos	2,06E+00	kg	2,75E+00	kg	
Secagem	Entradas	Subproduto	Agregados úmidos	2,06E+00	kg	2,75E+00	kg	
		Energia	Energia elétrica	1,92E+01	kWh	1,92E+01	kWh	
	Saídas	Emissões	Subproduto	Agregados secos	1,32E+00	kg	1,54E+00	kg
			Água	Água evaporada (<i>water to air</i>)	7,40E-01	dm ³	1,21E+00	dm ³
Queima	Entradas	Subproduto	Dióxido de carbono (CO ₂)	1,69E+00	kg	1,69E+00	kg	
		Energia	Energia elétrica	1,32E+00	kg	1,54E+00	kg	
	Saídas	Emissões	Subproduto	Agregados reciclados	1,58E+01	kWh	1,58E+01	kWh
			Água	Água evaporada (<i>water to air</i>)	1,00E+00	kg	1,00E+00	kg
				Água evaporada (<i>water to air</i>)	3,16E-01	dm ³	5,38E-01	dm ³
Resfriamento	Entradas	Subproduto	Dióxido de carbono (CO ₂)	1,39E+00	kg	1,39E+00	kg	
	Saídas	Produto final	Agregados reciclados	1,00E+00	kg	1,00E+00	kg	

Agregação dos dados do inventário						
Tipo de fluxo	Substância	RBC 50%		RBC 90%		Redução (%):
		Entrada	Saída	Entrada	Saída	
Recursos naturais	Argila (kg)	1,30		0,31		-
	RBC (kg)	0,67		1,43		-
	Água (L)	0,74		1,20		-
Energia	Óleo diesel (L)	3,83E-04		9,01E-05		-76,45 %
	Energia elétrica (kWh)	73,40		73,46		0,1 %
Emissões atmosféricas	CO ₂ (kg)		6,76E+00		6,56E+00	-2,95 %
	CO (g)		4,79E-01		1,51E-01	-68,44 %
	NO _x (g)		4,43E-02		1,39E-02	-68,57 %
	MP (g)		2,54E-03		7,26E-04	-71,41 %
	NMHC (g)		6,16E-02		1,82E-02	-70,41 %
	RCHO (g)		1,79E-02		5,66E-03	-68,39 %
	CH ₄ (g)		1,59E-02		5,02E-03	-68,39 %

ANEXO A – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: Avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida de agregados leves produzidos com resíduo industrial e argila local

Pesquisador: DEBORA PATRICIA BATISTA DA ROCHA

Área Temática:

Versão: 1

CAAE: 27357419.0.0000.5292

Instituição Proponente: Pós-Graduação em Engenharia Civil

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 3.907.357

Apresentação do Projeto:

Trata-se de uma pesquisa de campo sobre materiais, seu tempo de vida útil em uso na construção civil por meio de um questionário.

Objetivo da Pesquisa:

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o ciclo de vida de agregados leves produzidos com resíduo de biomassa da cana de açúcar (RBC) e argila local em comparação técnica com os agregados leves tradicionais em termos de impactos ambientais.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Descritas sendo os benefícios maiores que os riscos.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Termo de consentimento livre e esclarecido em linguagem de fácil compreensão.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Todos presentes.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Aprovado, não há dilemas éticos.

Endereço: Avenida Nilo Peçanha, 620 - Prédio Administrativo - 1º Andar - Espaço João Machado			
Bairro: Petrópolis			CEP: 59.012-300
UF: RN	Município: NATAL		
Telefone: (84)3342-5003	Fax: (84)3202-3941	E-mail: cep_huol@yahoo.com.br	