



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE



NATHALIE BARBOSA REIS MONTEIRO

GESTÃO DO CICLO DE VIDA: BASES PARA A APLICAÇÃO DA ECONOMIA
CIRCULAR NAS INDÚSTRIAS DE CONCRETO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Teresina

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE DOUTORADO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE
ASSOCIAÇÃO PLENA EM REDE: UFPI-UFC-UFRN-UFPB-UFPE-UFS-UESC-UFERSA
Avenida Universitária, nº1310 – Fone (86) 3215-5566 / E-mail: prodemadr@ufpi.edu.br

NATHALIE BARBOSA REIS MONTEIRO

**GESTÃO DO CICLO DE VIDA: BASES PARA A APLICAÇÃO DA ECONOMIA
CIRCULAR EM INDÚSTRIAS DE CONCRETO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Teresina

2021

NATHALIE BARBOSA REIS MONTEIRO

**GESTÃO DO CICLO DE VIDA: BASES PARA A APLICAÇÃO DA ECONOMIA
CIRCULAR EM INDÚSTRIAS DE CONCRETO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí, como requisito à obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Área de Concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Linha de Pesquisa: Planejamento, gestão e políticas socioambientais.

Orientador(a): Profa. Dra. Elaine Aparecida da Silva

Coorientador: Prof. Dr. José Machado Moita Neto

Teresina

2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Serviço de Processamento Técnico
Biblioteca Setorial de Ciências da Natureza – CCN

M775g Monteiro, Nathalie Barbosa Reis.

Gestão do ciclo de vida: bases para aplicação da economia circular em indústrias de concreto da construção civil / Nathalie Barbosa Reis Monteiro. – Teresina: 2021.

245 f. il: color.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências da Natureza, Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Teresina, 2021.

“Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elaine Aparecida da Silva”.

Coorientadores: Prof. Dr. José Machado Moita Neto.

1. Impacto Ambiental - Avaliação. 2. Gestão - Construção Civil. 3. Gestão – Ciclo de Vida. 3. Brita. I. Silva, Elaine Aparecida da. II. Título.

CDD 333.714

Bibliotecária: Caryne Maria da Silva Gomes – CRB3/1461

NATHALIE BARBOSA REIS MONTEIRO

**GESTÃO DO CICLO DE VIDA: BASES PARA A APLICAÇÃO DA ECONOMIA
CIRCULAR EM INDÚSTRIAS DE CONCRETO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí, como requisito à obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Área de Concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Linha de Pesquisa: Panejamento, gestão e políticas socioambientais.

Orientador(a): Profa. Dra. Elaine Aparecida da Silva

Coorientador: Prof. Dr. José Machado Moita Neto

Aprovada em 19/agosto/2021

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Elaine Aparecida da Silva (UFPI)
Orientadora

Profa. Dra. Giovana Mira de Espíndola (UFPI)
Membro Interno ao Programa

Prof. Dr. Calebe Paiva Gomes de Sousa (UFPI)
Membro Externo ao Programa

Prof. Dr. Lucas Rosse Caldas (UFRJ)
Membro Externo à Instituição

Profa. Dra. Simone Machado Santos (UFPE)
Membro Externo à Instituição

Ao meu pai...
...minha alma gêmea.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, minha família, amigos, colegas de curso, professores e todos que estiveram comigo (de perto e de longe) durante essa jornada.

Agradeço aos meus orientadores e amigos, professores Elaine e Moita, por dividirem comigo seus conhecimentos, pelo tempo investido, pelos incentivos, por acreditarem na minha capacidade e por me tornarem a pesquisadora/professora que sou hoje.

A todos, meu muito obrigada!

RESUMO

O modelo econômico vigente contém, inevitavelmente, etapas de extração de recursos naturais, processamento intermediário dessa matéria-prima, posterior transformação em materiais de aplicação diversa, segundo as necessidades reais ou magnificadas da sociedade e geração de resíduos. A crescente demanda por produtos industrializados acarreta, proporcionalmente, em um aumento na extração de recursos naturais. Fatores de ordem econômica, social e ambiental apontam para a insustentabilidade desse modelo linear de economia. Diversas são as soluções apresentadas, entre elas está o modelo de economia circular. O conceito de economia circular, embora objeto de inúmeras controvérsias, propõe a reutilização dos resíduos, dentro de uma cadeia produtiva, reduzindo o desperdício, gerando ganhos econômicos, sociais e ambientais. No presente trabalho foi feita uma análise sistemática na literatura científica, acompanhada de visitas à três indústrias de mineração de brita, localizadas na região de Monsenhor Gil, Piauí, Brasil, para avaliar a contribuição da mineração, de forma geral e, em especial, a mineração de brita, com os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e analisar a legislação ambiental existente para o setor, dentro dos preceitos do Direito Minerário brasileiro. As visitas visaram acompanhar o processo de extração, beneficiamento e comercialização do mineral diabásio, do qual é produzida a brita utilizada nas indústrias da construção civil pesquisada nesse estudo. Além disso, foi utilizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como metodologia para avaliar ambientalmente produtos da construção civil que utilizam a brita como insumo: o concreto usinado e o poste. Baseado nas normas NBR ISO 14040 e 14044, e nas normas europeias EN 15978 e EN 15804 foi avaliado o ciclo de vida deste agregado dentro da cadeia produtiva da construção civil. Foram visitados dois ramos industriais, dentro desse setor, na cidade de Teresina, estado do Piauí, Brasil: três indústrias concreteiras e quatro fábricas de postes de concreto armado para rede de distribuição de energia elétrica. O alvo das visitas foi acompanhar o processo produtivo desses materiais, bem como colher dados por meio de entrevistas com os gestores das empresas. Foram elaborados questionários contemplando todas as informações necessárias para a construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que visa identificar todas as entradas e saídas de um empreendimento. No universo de dados primários constam: consumo de água e energia; descrição e quantidade de máquinas e equipamentos; descrição dos processos produtivos; quantidade e tipo de resíduos produzidos; transporte e distância percorrida dos insumos até a fábrica e do produto até o consumidor final, entre outros. Os dados secundários foram obtidos na literatura científica e em relatórios especializados do setor. Foram adotados dois métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV): o ReCiPe *Midpoint* (H) e o CML (*baseline*), que foram utilizados simultaneamente, ou separadamente, de acordo com o objetivo e escopo do estudo de cada um dos produtos analisados. A seleção das categorias de impacto, para análise, também, foi feita de acordo com o objeto em estudo e com as características peculiares de cada processo produtivo. Ademais, foram conduzidas análises de sensibilidade para os dois produtos (concreto e poste), com a elaboração de diferentes cenários, com a alteração de parâmetros como o reaproveitamento dos resíduos e efluentes, simulação de diferentes distâncias percorridas pelo transporte dos insumos, substituição da sílica ativa por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e redução do teor de cimento na mistura do concreto, constatando a diminuição dos potenciais impactos ambientais para ambos, concreto e postes, e a possibilidade de aplicação da simbiose industrial, para reaproveitamento de resíduos, com base em Gestão do Ciclo de Vida (GCV). Assim, o estudo contribui cientificamente com bases para a mitigação dos impactos gerados por essas indústrias, uma vez que foi possível estabelecer algumas diretrizes para a mudança da economia linear para uma economia mais próxima da circular, no setor da construção civil que consome brita.

Palavras-chave: Gestão do Ciclo de Vida. Construção Civil. Brita.

ABSTRACT

The current economic model, inevitably, contains stages of natural resources' extraction, intermediate processing of this raw material, subsequent transformation into materials with different application, according to the society's real or magnified needs, and generation of residues. The growing demand for industrialized products causes, proportionally, an increase in the extraction of natural resources. Economic, social, and environmental factors point to the unsustainability of this linear economic model. The solutions presented are diverse, among them is the circular economy model. The concept of circular economy, although it is object of countless controversies, proposes the reuse of waste, within a productive chain, reducing losses, generating economic, social, and environmental gains. In the present research, a systematic analysis was carried out in the scientific literature, accompanied by visits to three crushed stone mining industries, located in the Monsenhor Gil, Piauí, Brazil, to assess the contribution of mining, in general and, particularly, the crushed stone mining, with the 17 Sustainable Development Goals (SDG) and to analyze the existing environmental legislation for the sector, within the Brazilian Mining Law precepts. The visits aimed to follow the process of extraction, processing, and commercialization of the diabase mineral, from which the crushed stone used in the surveyed industries is produced. In addition, it was used the Life Cycle Assessment to evaluate, environmentally, construction products that use crushed stone as an input: concrete and poles. Based on the NBR ISO 14040 and 14044 standards, and on the EN 15978 e EN 15804 European standards the life cycle of this aggregate was evaluated within the productive chain of civil construction. Two kinds of industries were visited, within this sector, in Teresina, state of Piauí, Brazil: three concrete industries and four pole factories. The purpose of the visits was to monitor the production process of these materials, as well as to collect data through interviews with the managers. Questionnaires were prepared covering all the information necessary for the construction of the Life Cycle Inventory (LCI), which aims to identify all the inputs and outputs of an enterprise. The universe of primary data includes water and energy consumption; description and quantity of machinery and equipment; description of production processes; quantity and type of produced waste; transport and distance traveled from the inputs to the factory and the product to the final consumer, among others. Secondary data were obtained from the scientific literature and specialized reports. Two methods of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) were adopted: ReCiPe Midpoint (H) and CML (baseline), which were used together, or separately, according to the objective and scope of each analyzed products. The impact categories selection, for analysis, was also made according to the object under study and with the peculiar characteristics of each production process. In addition, sensitivity analyzes were conducted for both products (concrete and post), with the elaboration of different scenarios, with the alteration of parameters such as the reuse of waste and effluents, simulation of different distances traveled by the transport of inputs, replacement of active silica by sugarcane bagasse ash and reduction of the cement content in the concrete mixture, verifying the reduction of potential environmental impacts for both, concrete and poles, and the possibility of applying industrial symbiosis, for reuse of residues, based on Life Cycle Management (GCV). Thus, the study contributes to the mitigation of impacts generated by these industries once it was possible to establish some guidelines for the change from the linear economy to an economy closer to the circular, in the civil construction sector that consumes crushed stone.

Keywords: Life Cycle Management. Construction. Crushed Stone.

LISTA DE FIGURAS

Referencial Teórico

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo produtivo da brita.....26

Capítulo 6 – Avaliação ambiental em indústrias que fabricam concreto

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação de concreto.....124

Figura 2 – Potencial de depleção da camada de ozônio na produção de concreto..... 139

Figura 3 – Potencial de aquecimento global na produção de concreto.....140

Figura 4 – Potencial de acidificação na produção de concreto.....141

Figura 5 – Potencial de toxicidade humana na produção de concreto.....145

Figura 6 – Potencial de ecotoxicidade de água doce na produção de concreto.....146

Figura 7 – Resultado da análise de incerteza dos impactos ambientais potenciais para as categorias comuns aos dois métodos CML e ReCiPe (que possuem a mesma unidade de referência).....150

Capítulo 7 – Avaliação ambiental em indústrias que fabricam postes

Figura 1 – Fluxograma do processo de produção de postes.....175

Figura 2 – Postes com deformidades.....186

Figura 3 – Identificação de postes Duplo T, segundo a ABNT.....187

Figura 4 – Representação do desvio padrão em relação à média obtida na simulação de Monte Carlo.....194

Capítulo 8 – Otimização ambiental no limite da competitividade: o papel da análise de sensibilidade

Figura 1 – Representação gráfica dos cenários 1 e 2 para a produção de concreto.....220

Figura 2 – Representação gráfica dos cenários 1 e 2 para a produção de postes.....224

LISTA DE TABELAS

Capítulo 4 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na mineração

Tabela 1 – Quantidade de artigos encontrados no portal da CAPES para cada ODS.....	52
--	----

Capítulo 6 – Avaliação ambiental em indústrias que fabricam concreto

Tabela 1 – Inventário do Ciclo de vida da produção de concreto: fluxo de entrada (<i>Inputs</i>)..	125
Tabela 2 – Inventário do Ciclo de vida da produção de concreto: fluxo de saída (<i>Outputs</i>)..	126
Tabela 3 – Distância dos insumos às indústrias.....	135
Tabela 4 – Resultado do Impacto do Ciclo de Vida para os métodos CML e ReCiPe.....	137
Tabela 5 – Resultado da análise de incerteza pela simulação Monte Carlo (1.000 interações e 95% de confiança).....	149
Tabela 6 – Coeficiente de variação (%).....	149

Capítulo 7 – Avaliação ambiental em indústrias que fabricam postes

Tabela 1 – Inventário do Ciclo de vida da produção de postes: fluxo de entrada (<i>Inputs</i>).....	177
Tabela 2 – Inventário do Ciclo de vida da produção de postes: fluxo de saídas (<i>Outputs</i>)....	177
Tabela 3 – Distância dos insumos às indústrias.....	184
Tabela 4 – Resultado do Impacto do Ciclo de Vida da produção de postes.....	188
Tabela 5 – Resultado da análise de incerteza utilizando a combinação da Matriz Pedigree com a simulação Monte Carlo (1.000 interações e 95% de confiança).....	193

Capítulo 8 – Otimização ambiental no limite da competitividade: o papel da análise de sensibilidade

Tabela 1 – Inventário do Ciclo de Vida da produção de concreto.....	215
Tabela 2 – Inventário do Ciclo de vida da produção de postes.....	216
Tabela 3 – Comparação entre o resultado do potencial impacto para as categorias do método CML a partir dos dados coletados e alterados para o concreto.....	220
Tabela 4 – Comparação entre o resultado do potencial impacto para as categorias do método CML a partir dos dados coletados e alterados para os postes.....	223

LISTA DE QUADROS

Referencial teórico

Quadro 1 – Categorias de impacto disponíveis nos diversos métodos de AICV.....42

Capítulo 4 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na mineração

Quadro 1 – Ações para aplicação dos ODS na mineração.....76

Capítulo 5 – Direito Minerário: em busca de uma mineração sustentável

Quadro 1 – Impactos positivos e negativos causados pela atividade minerária.....90

Quadro 2 – Categorias identificadas na lei, relacionadas à sustentabilidade.....92

Quadro 3 – Análise crítica de cada jurisprudência, bem como os impactos associados a elas.....108

Capítulo 6 – Avaliação ambiental em indústrias que fabricam concreto

Quadro 1 – Estudos de ACV sobre concretos encontrados na literatura científica e suas abordagens.....120

Quadro 2 – Componentes do concreto, sua função e impactos associados.....121

Quadro 3 – Métodos ReCiPe e CML e unidade de referência de acordo com as categorias de impacto indicadas na norma EN 15804:2019.....128

Quadro 4 – Matriz de Pedigree.....132

Capítulo 7 – Avaliação ambiental em indústrias que fabricam postes

Quadro 1 – Matriz de Pedigree.....180

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Área
ABCIC	Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto
ABEI	Associação Brasileira de Engenharia Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTC	Associação Brasileira de Logística e Transporte de Cargas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AgRg	Agravo Regimental
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANEPAC	Associação Nacional de Entidades dos Produtores de Agregados para a Construção Civil
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANP	Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APOS	Sistema de Alocação no Ponto de Substituição
APP	Áreas de Proteção Permanente
BA	Bahia
BR	Brasil
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CEFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CFC	Clorofluorcarbono
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CEPISA	Centrais Elétrica do Piauí S/A
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
daN	DecaNewton
DB	Diclorobenzeno
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EDcl	Embargo de Declaração
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América

Eq	Equivalente
Fe	Ferro
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
g	Gramma
GCV	Gestão do Ciclo de Vida
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLO	<i>Global</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	<i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kVA	Quilovolt-Ampere
kWh	Quilowatt-hora
l	Litro
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCI	<i>Life Cycle Inventory</i>
LCIA	<i>Life Cycle Impact Assessment</i>
LCM	<i>Life Cycle Management</i>
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MJ	Megajoule
mm	Milímetro
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
N	Nitrogênio
NBR	Normas Brasileiras
NH ₃	Amônia

NMVOC	Compostos orgânicos voláteis não-metano
NOx	Óxidos de Nitrogênio
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
PAE	Plano de Aproveitamento Econômico
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PIB	Produto Interno Bruto
PM10	Partículas inaláveis
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PO ₄	Fosfato
RAL	Relatório Anual de Lavra
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RoW	<i>Rest of the World</i>
SINDUSCON	Sindicato da Indústria da Construção Civil
SINPROCIM	Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SOx	Óxidos de Enxofre
SO ₂	Dióxido de enxofre
STJ	Supremo Tribunal de Justiça
t	Tonelada
TFRM	Taxa de Controle, Monitoramento e Supervisão de Exploração e Mineração de Recursos Minerais
U235	Urânio enriquecido
UE	União Europeia
UN	<i>United Nation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	20
1.2	Justificativa e relevância da pesquisa	21
1.3	Hipóteses	21
1.4	Estrutura da tese	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	Caracterização de insumos e produtos das indústrias que fabricam concreto e postes	24
2.1.1	O concreto	24
2.1.2	Agregados (brita e areia)	25
2.1.3	Cimento	27
2.1.4	Água	28
2.1.5	Aditivos	29
2.1.6	O poste	30
2.2	Economia Circular: conceito, aplicações e possibilidades	31
2.2.1	Economia circular na construção civil e na mineração de brita	34
2.2.2	Entraves na aplicação da economia circular	37
2.3	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	39
2.3.1	Métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	41
2.4	Gestão do Ciclo de Vida (GCV)	44
3	METODOLOGIA	47
3.1	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável na mineração e Direito minerário: em busca de uma mineração sustentável	47
3.2	Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em indústrias de concreto e postes	47
4	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA MINERAÇÃO.....	49
	Resumo	49
4.1	Introdução	49
4.2	Metodologia	50
4.3	Resultados e discussão	51
4.3.1	ODS 1: Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares	52
4.3.2	ODS 2: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável	54
4.3.3	ODS 3: Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades.....	56
4.3.4	ODS 4: Assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos	57
4.3.5	ODS 5: Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas	59
4.3.6	ODS 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos	61

4.3.7 ODS 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos	62
4.3.8 ODS 8: Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos	64
4.3.9 ODS 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.....	65
4.3.10 ODS 10: Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles	67
4.3.11 ODS 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis	68
4.3.12 ODS 12. Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.....	69
4.3.13 ODS 13. Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos..	70
4.3.14 ODS 14. Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.....	71
4.3.15 ODS 15. Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.....	72
4.3.16 ODS 16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis	74
4.3.17 ODS 17. Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.....	75
4.4 Conclusão	76
Agradecimentos.....	78
Referências.....	78
5 DIREITO MINERÁRIO: EM BUSCA DE UMA MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL	88
Resumo	88
Abstract	88
5.1 Introdução.....	89
5.2 Metodologia	91
5.3 Resultados e discussão	93
5.3.1 O princípio da dualidade imobiliária.....	93
5.3.2 O alvará de pesquisa mineral.....	94
5.3.3 O sistema de outorga.....	96
5.3.4 A relação entre o superficiário e minerador	97
5.3.5 A Avaliação de Danos e Renda.....	98
5.3.6 O princípio da rigidez locacional	99
5.3.7 O princípio da responsabilidade intergeracional	100
5.3.8 O licenciamento ambiental.....	100
5.3.9 A obrigatoriedade da recuperação ambiental	102
5.3.10 A servidão minerária	104

5.3.11 A audiência pública como instrumento de promoção da sustentabilidade	106
5.3.12 A educação como instrumento de promoção da sustentabilidade	107
5.4 Conclusão	109
Agradecimentos.....	110
Referências	110
6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL EM INDÚSTRIAS QUE FABRICAM CONCRETO	116
Resumo	116
Abstract	116
6.1 Introdução	117
6.1.1 Componentes do concreto	121
6.2 Metodologia	121
6.2.1 Definição do objetivo, escopo e unidade funcional.....	122
6.2.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida	125
6.2.3 Critério de escolha dos métodos de AICV	127
6.2.4 Normalização	130
6.2.5 Estimativa de incerteza.....	130
6.2.6 Caracterização geral das usinas de produção de concreto.....	134
6.2.7 Descrição do processo produtivo	135
6.3 Resultados	136
6.3.1 Resultado da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	136
6.3.2 Resultado da análise de incerteza.....	147
6.4 Discussão e interpretação dos resultados	151
6.5 Conclusão	156
Agradecimentos.....	157
Referências	158
7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL EM INDÚSTRIAS QUE FABRICAM POSTES DE CONCRETO ARMADO	167
Resumo	167
Abstract	167
7.1 Introdução	168
7.1.1 Controle de qualidade na fabricação de postes	170
7.2 Metodologia	172
7.2.1 Definição do objetivo, escopo e unidade funcional.....	172
7.2.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida	176
7.2.3 Estimativa de incerteza.....	178
7.2.4 Caracterização geral das indústrias	183
7.2.5 Processo de produção de postes	185
7.3 Resultados	187

7.3.1 Resultado da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	187
7.3.2 Resultado da Análise de Incerteza.....	192
7.4 Discussão dos resultados	195
7.4.1 Interpretação dos resultados da AICV.....	195
7.4.2 Oportunidades de melhorias na gestão de transportes, resíduos e efluentes das indústrias de postes.....	197
7.5 Conclusão	202
Agradecimentos.....	204
Referências.....	204
8 OTIMIZAÇÃO AMBIENTAL NO LIMITE DA COMPETITIVIDADE: O PAPEL DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	211
Resumo	211
Abstract	211
8.1 Introdução	212
8.2 Metodologia	213
8.2.1 Análise do inventário do ciclo de vida do poste e do concreto.....	215
8.3 Resultados e discussão	217
8.3.1 Análise de sensibilidade para a produção de concreto.....	217
8.3.2 Análise de sensibilidade para a produção de postes de concreto armado.....	222
8.4 Conclusões	227
Agradecimentos.....	228
Referências.....	228
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	232
Referências.....	235
APÊNDICE A – Instrumento de coleta de dados.....	244
APÊNDICE B – Normas ABNT para fabricação de postes.....	245

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável pelas obras de urbanização e infraestrutura das cidades, através da construção de habitações, pontes, pavimentação de estradas, obras de saneamento básico, entre outros. A brita é um dos insumos mais utilizados nesses empreendimentos, o que torna esse agregado, o mineral mais consumido no mundo (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL – ANEPAC, 2018).

A extração de brita é o primeiro elo da cadeia produtiva de agregados para a construção civil. A destinação da brita se dá da seguinte maneira: 85% são para os segmentos de concreteiras, pré-fabricados, construtoras e revendedores, com a finalidade de uso nas edificações residenciais, comerciais, industriais e institucionais. Os 15% restantes são destinados à produção de asfalto para o segmento de pavimentadoras com a finalidade de uso nas obras de infraestrutura (ANEPAC, 2018). A escolha, nesse estudo, das indústrias que fabricam concreto e postes se deu pelo fato de, pelo menos, 85% do consumo de brita ser destinado para esse fim.

A exploração de brita, assim como as indústrias que a utilizam, provoca impactos ambientais negativos que afetam os ecossistemas natural e humano. Muitos deles estão relacionados à depleção dos recursos naturais, mudanças na paisagem, emissões atmosféricas, contaminação do solo e da água, supressão da vegetação, produção de resíduos, entre outros (INGRAO *et al.*, 2014; KIM; TAE, 2016; MONTEIRO; MOITA NETO; SILVA, 2018).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), cujo propósito é estabelecer um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade, em prol do desenvolvimento sustentável (ONU, 2020). Dentre os ODS, estão aqueles relacionados à indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9), cidade e comunidades sustentáveis (ODS 11) e consumo e produção sustentáveis (ODS 12), além do ODS 7, relativo ao acesso à energia, que podem ser alcançados, nas indústrias concreteiras e fábricas de postes, indo de encontro ao cumprimento da agenda 2030. Para isso, é preciso que sejam estudados os processos envolvidos na produção de concreto e postes, com a simulação de cenários que indiquem estratégias para uma produção mais sustentável.

Existem metodologias, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que possibilitam identificar e mensurar potenciais impactos ambientais associados a diferentes estágios do ciclo de vida de produtos, processos e serviços, conduzindo a uma melhor gestão no processo de produção. A utilização de ferramentas como a ACV possibilita estabelecer uma mudança de

paradigma, onde os materiais são extraídos, beneficiados, consumidos e descartados, para um modelo econômico/industrial no qual há aproveitamento dos resíduos, através do aprimoramento da eficiência dos processos produtivos. Rigamonti *et al.* (2017) atestam que, no contexto das estratégias da economia circular, a ACV pode ajudar a garantir que a recuperação de recursos não represente encargos adicionais ao meio ambiente e que os impactos evitados sejam, sistematicamente, contabilizados.

A Gestão do Ciclo de Vida (GCV), no entanto, ultrapassa as fronteiras da ACV: a aplicação desse conceito nos setores industriais e de serviços, possibilita a melhora nos processos produtivos, ao mesmo tempo em que melhora o desempenho geral da sustentabilidade dos negócios e de suas cadeias de valor. Nesse sentido, a GCV envolve todos os departamentos de uma empresa (pesquisa e desenvolvimento, compras e marketing etc.), melhorando a colaboração entre as partes interessadas ao longo da cadeia de valor da organização. A GCV aborda, não apenas aspectos ambientais, mas também sociais e econômicos ao longo do ciclo de vida de produtos e serviços, vinculando o gerenciamento da sustentabilidade e o desempenho de organizações e produtos ao valor comercial (SONNEMANN; MARGINI, 2015).

Com o auxílio da ACV e da GCV, é possível fazer uma análise do desempenho ambiental da brita, ao longo da cadeia da construção civil, de modo que todo o processo produtivo, que envolve a utilização desse mineral, possa incorporar o conceito de economia circular. Os ganhos ambientais, nesse setor, são provenientes de cenários mais próximos da economia circular, que antevêm o aproveitamento dos resíduos, diminuição a exploração das jazidas naturais de brita, e o aumento da eficiência dos processos produtivos. O cenário ideal é aquele que gera desenvolvimento econômico/ambiental/social.

1.1 Objetivos

A pesquisa foi desenvolvida na cidade de Teresina – PI e região, no setor da construção civil. O alvo são as empresas do setor que utilizam a brita como insumo: as concreteiras e fábricas de postes. O objetivo geral desse estudo é avaliar a aplicabilidade de uma economia mais próxima da circular nas indústrias da construção civil que fabricam concreto e postes. Como objetivos específicos tem-se:

- Verificar a contribuição do setor minerário, especialmente, a mineração de brita, com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS);

- Avaliar a aplicabilidade do Direito Minerário brasileiro, em prol da sustentabilidade ambiental, econômica e social;
- Identificar e avaliar os impactos ambientais no ciclo de vida do concreto e do poste;
- Verificar se há redução dos potenciais impactos ambientais por meio de uma análise de sensibilidade, com mudanças de cenário
- Identificar os tipos de resíduos e a possibilidade de reaproveitamento, de acordo com as empresas envolvidas (concreteiras e fábricas de postes), por meio da simbiose industrial.

1.2 Justificativa e relevância da pesquisa

O estudo justifica-se tendo em vista a ausência de pesquisas com essa abordagem, nesse setor, no Piauí, trazendo o preenchimento dessa lacuna no conhecimento sobre o assunto, nessa região. É um ramo que vem experimentando crescimento no decorrer dos últimos anos, causando diversos impactos ambientais, sendo muitos em consequência do desperdício de material. Esse fato aponta para uma má gestão nos processos produtivos, gerando perda de receita e impactos ambientais diversos.

A pesquisa contribuiu com conhecimentos sobre os impactos ambientais causados pela utilização da brita para a confecção de concreto e postes, possibilitando indicar alternativas para melhorar os processos produtivos dessas indústrias, do ponto de vista ambiental, econômico e social. Além disso, promoveu conhecimentos acerca da contribuição da mineração com o alcance dos 17 ODS e sobre a aplicação prática do Direito Minerário brasileiro. Ademais, esse trabalho traz a base para a elaboração de um *framework* para avaliação ambiental, com base em princípios da ACV, para agregados de construção civil. Futuros estudos podem ser elaborados com a finalidade de criar um *framework* de aplicabilidade, tanto global, como local, para estudos de casos brasileiros de britas, concreto e postes.

1.3 Hipóteses

A cadeia produtiva da brita envolve muitas empresas, que geram um volume significativo de resíduos que poderiam ser aproveitados. Como hipótese preliminar, tem-se que as indústrias da construção civil, particularmente as centrais de concreto usinado e fábricas de postes, que utilizam a brita como insumo, e que são objeto desse estudo, geram diversos impactos ambientais/econômicos/sociais durante o ciclo de vida de seus produtos (concreto e

postes). Dessa forma, o estudo procura responder a seguinte pergunta: quais ações podem contribuir para o desenvolvimento das atividades do setor da construção civil, especialmente a fabricação de concreto e postes, de forma sustentável, do ponto de vista ambiental, econômico e social, contribuindo para uma economia mais próxima da circular?

A ACV proporciona uma análise criteriosa dos potenciais impactos associados à utilização da brita, ao longo do seu ciclo de vida. Dessa forma, é possível identificar as etapas em que ocorrem os maiores impactos adversos. Outra identificação possível nesse estudo é quanto às perdas de materiais, a fim de que os mesmos sejam reaproveitados. A simbiose industrial possibilita uma melhor gestão do processo produtivo, dentro dos princípios da economia circular, visando o aprimoramento da performance financeira das empresas, aliada à diminuição dos impactos ao meio ambiente e a busca da justiça social.

1.4 Estrutura da tese

A tese está estruturada em forma de artigos. O trabalho está dividido nos seguintes tópicos: introdução, referencial teórico, metodologia e quatro artigos. Ao final, foram feitas as considerações finais, trazendo, de forma sucinta, as conclusões do estudo.

No primeiro artigo, publicado no periódico *Journal of Cleaner Production*¹, a fim de complementar o entendimento sobre o setor minerário, foi feita uma pesquisa sistemática na literatura científica e visitas a três indústrias de produção de brita (mineração de diabásio), cujo mineral é utilizado nas indústrias da construção civil pesquisadas nesse estudo, com o objetivo de analisar a contribuição da mineração com os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

O segundo artigo, publicado no periódico *Sustainability*² envolve a aplicação da legislação ambiental existente para o setor de mineração, com base nos preceitos do Direito Minerário brasileiro. Nos terceiro e quarto artigos foi utilizada a ACV para o estudo do concreto e dos postes utilizados em redes de distribuição de energia elétrica.

Por fim, foram conduzidas análises de sensibilidade para os produtos estudados, com a elaboração de diferentes cenários, com vistas ao reaproveitamento dos resíduos e efluentes,

¹ MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A.; MOITA NETO, J. M. Sustainable development goals in mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 509-520, 2019.

² MONTEIRO, N. B. R. BEZERRA, A. K. L.; MOITA NETO, J. M.; SILVA, E. A. d. Mining Law: In Search of Sustainable Mining. **Sustainability**, v. 13, p. 1-16, 2021.

substituição da sílica ativa por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, diminuição do teor de cimento no traço do concreto, além de simular diferentes distâncias percorridas para o transporte dos insumos, a fim de analisar a possibilidade de aplicação da simbiose industrial, baseada em GCV, considerando aspectos como localização, disponibilidade técnica, viabilidade econômica e benefícios ambientais, para a implementação de uma economia mais próxima da circular no setor da construção civil, que utiliza brita como insumo.

Outras duas publicações com participação em eventos, decorrentes dessa pesquisa, até o momento foram:

- MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A. Circular economy in the scientific literature. In: VI Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, 2018, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: IBICT, 2018. p. 537-543.

- MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A.; MOITA NETO, J. M. Possibilities for sustainable development in crushed stone mining. In: 9th German-Brazilian Symposium, 2019. Stuttgart. **Anais** [...]. Stuttgart, 2019. p. 100.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização de insumos e produtos das indústrias que fabricam concreto e postes

A construção civil é composta por uma cadeia de indústrias que fabricam produtos ligados à infraestrutura urbana. Em 2018, existiam 197.667 empresas atuando no setor da construção civil, no Brasil. Desse total, 33.698 estão na região Nordeste, sendo que 2.070 se encontram no Piauí (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC, 2020).

O ramo engloba empresas de vários segmentos, tais como: fornecedores de matéria-prima, máquinas e equipamentos, prestadores de serviços, construtoras, pavimentadoras, concreteiras, indústria cerâmica, entre outras (ANEPAC, 2018), que utilizam uma infinidade de insumos diferentes, sendo a maioria, extraídos da natureza, como a brita.

Dentre os diversos impactos ambientais comuns às indústrias desse setor está a geração de resíduos, muitos deles, potencialmente reaproveitáveis (ESA; HALOG; RIGAMONTI, 2017). No entanto, é preciso avaliar a viabilidade econômica, tecnológica, logística, entre outros fatores para que o uso dessa alternativa não se torne mais impactante para o meio ambiente ou inviável economicamente (COELHO; BRITO, 2013).

A ferramentas que contabilizam e avaliam os impactos ambientais de produtos, como os da construção civil, a partir dos insumos (entradas do sistema) e dos resíduos/efluentes/emissões gerados (saídas do sistema), contribuem para encontrar formas de desenvolver a atividade minimizando os impactos negativos e maximizando o uso de insumos alternativos e processos menos agressivos ao meio ambiente. Além disso, é possível avaliar formas de potencializar os impactos econômicos e sociais positivos da atividade.

2.1.1 O concreto

O concreto é o material resultante da mistura de agregados (areia e brita como agregados miúdos e graúdos, respectivamente), água, cimento, podendo, ou não, conter aditivos químicos e adições minerais (como por exemplo, materiais pozolânicos). A produção pode ser feita em usinas de concreto, na própria obra onde será empregado (*in loco*), ou em caminhão betoneira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2012). O concreto dosado em central proporciona um produto de melhor desempenho, uma vez que a dosagem

adequada dos insumos possibilita seu racionamento, há um controle melhor da quantidade e mais segurança e durabilidade. Esse tipo de concreto é preparado em empresas concreteiras e transportado até o canteiro de obras por caminhões betoneiras.

Estima-se que, anualmente, no mundo todo, são consumidas, aproximadamente, 11 bilhões de toneladas de concreto, um consumo médio de 1,9 ton/hab por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil, a quantidade de concreto que sai de centrais dosadoras é cerca de 30 milhões de metros cúbicos, por ano (INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 2018). O concreto de cimento Portland é um produto básico da indústria da construção civil, sendo formado por: 42% de agregado graúdo (brita), 40% de agregado miúdo (areia), 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos (LUZ E ALMEIDA, 2012). Essa proporção é comum nos traços de concreto usualmente empregados no setor.

2.1.2. Agregados (brita e areia)

Segundo a ABNT (2005), agregado miúdo (areias) é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm e agregado graúdo (brita) é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Na composição do concreto, contribuem para o aumento da resistência e da durabilidade, uma vez que são compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis e duráveis.

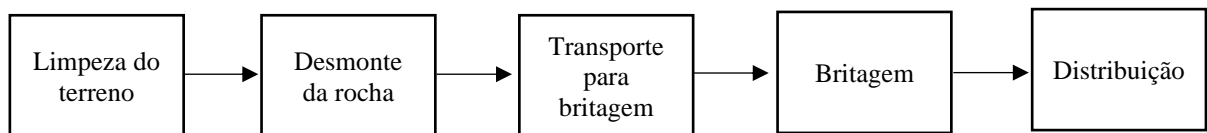
A brita é um agregado (normalmente empregado como agregado graúdo) utilizado na construção civil, que pode ser obtida a partir de diversas rochas, como: granito, gnaisse, basalto, diabásio, calcário, dolomita, quartzito e cascalho (ENGIDASEW; BARBIERI, 2014; DNPM, 2016). Nos estudos ambientais feitos para a instalação das indústrias que exploram brita há a previsão do tempo de vida útil das jazidas. Um exemplo são as mineradoras localizadas em Monsenhor Gil, Piauí, que possuem uma previsibilidade de exploração, desde o ano 2000, de duzentos anos. Assim, a exploração das jazidas minerais pode perdurar por muitos anos, atravessando gerações.

Segundo o relatório elaborado por Quaresma (2009) para o Ministério de Minas e Energia (MME), os recursos minerários para a produção de brita, no Brasil, são abundantes. É importante fazer o levantamento de reservas a fim de acompanhar sua evolução, prever sua exaustão, indicar necessidade de novos investimentos em pesquisa mineral, criar políticas de incentivo à busca de recursos etc. No entanto, em relação às rochas para produção de brita para

construção civil, isso não se aplica, pois na maior parte do Brasil, os recursos existem em abundância. A ação política necessária é fazer mapeamento sistemático para identificação desses recursos, qualificá-lo e criar sistema de proteção por meio de ordenamento territorial para o seu uso.

O processo de obtenção da brita inicia-se com a limpeza do terreno para o desmonte da rocha (com auxílio de explosivos), passando pela britagem em equipamentos específicos (britador) até se obter brita em granulometrias diversas, de acordo com a finalidade, para entrega ao consumidor final (MONTEIRO; SILVA, 2018). O fluxograma da Figura 1 demonstra, simplificada, o processo de obtenção da brita:

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo produtivo da brita



Fonte: Autores

A brita, juntamente com outros materiais, é utilizada na fabricação de diversos produtos da construção civil como concreto, postes, asfalto e seus derivados, e pode ser empregada diretamente nas obras de infraestrutura e construções. Um exemplo comum, onde o uso da brita é facilmente visualizado, é no pátio de estacionamentos. A sua abundância na natureza faz com que seja um material de baixo custo e, por isso, de difícil substituição. Um dos desafios enfrentado pelas indústrias é utilizar materiais reciclados que tenham o mesmo desempenho do agregado natural, que apresentem a qualidade e desempenho exigidos e a viabilidade econômica para a confecção de seus produtos, diminuindo, assim, a extração das jazidas e, conseqüentemente, os diversos impactos causados por essa forma de mineração.

A areia pode ser obtida em leito de rios, planícies costeiras, coberturas de morros, entre outros. Frequentemente, é comercializada da forma como foi extraída, porém, pode ser submetida a processos de beneficiamento. Os métodos de lavra empregados na extração de areia para a construção civil podem ser de três tipos, dependendo da natureza do depósito que está sendo lavrado: a dragagem é feita em leitos de rio ou em cavas inundadas, onde a areia em lavra se encontra abaixo do nível freático; o desmonte hidráulico é usado em cavas secas e em mantos de alteração de maciços rochosos; e o método de lavra por tiras (*stripping mining*) é usado em depósitos homogêneos e de maior extensão horizontal (LUZ; ALMEIDA, 2012).

Ambos os procedimentos (extração de areia e brita) causam diversos impactos ambientais, tais como: exaustão das minas e jazidas e falta de recuperação do ambiente

degradado (JOSA; JORBA; VALLEJO, 2012), mudanças na paisagem (MURESAN; GLIGOR, 2015), na morfologia e qualidade do solo (TABATABAEI; MOHAMMADI, 2013); vibração do terreno (OZER *et al.*, 2008); desmatamento (UBAQUE; VACA; RODRÍGUES, 2014), afugento da fauna (MILISA; ZIVKOVIC; HABDIJA, 2010), poluição do ar (PENG *et al.*, 2016) e sonora (DUARTE *et al.*, 2015) e desequilíbrio ambiental (VIEIRA; RESENDE, 2015).

Os impactos socioeconômicos estão ligados à dinamização da economia regional, uma vez que essas indústrias contribuem gerando empregos, promovendo a circulação de capital, movimentando o comércio local, além de incrementar a arrecadação do estado e do município através do pagamento de impostos (TAKANO; FLORES; LIMA, 2016). No entanto, é preciso analisar até que ponto esses benefícios sociais devem superar os danos ambientais.

Há uma tarifa a ser paga mensalmente pelas indústrias de mineração, a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerários (CEFEM), como parte do custo ambiental da exploração de recursos naturais não renováveis. A alíquota aplicada incide sobre a receita bruta da venda, sendo observado o limite máximo de 4%. Além da CEFEM, há também uma taxa a ser paga anualmente, por hectare, em função do tipo de mineral explorado, e os emolumentos referentes ao requerimento de autorização de pesquisa (BRASIL, 2017). Os recursos recolhidos são destinados a projetos que, direta ou indiretamente, beneficiem a comunidade local, muitos deles, ligados à construção civil. O pagamento de tarifas mais altas pode contribuir com a inibição da atividade em áreas onde a preservação ambiental deve ser considerada prioritária em relação aos benefícios sociais.

Nesse contexto, o uso de metodologias e ferramentas que proporcionem a análise ambiental necessária para a busca da melhor utilização da brita e da areia, ou da sua substituição por agregados reciclados, podem contribuir com a redução dos impactos negativos do ciclo de vida de produtos que a utilizam como insumo.

2.1.3 Cimento

A produção e consumo de cimento são importantes indicadores de investimento de um país, pois, por ser um produto de difícil substituição, está presente em todos os tipos de construções. Em 2016, o parque produtor de cimento, no Brasil, contava com 100 fábricas, controladas por 24 grupos industriais, espalhadas por 88 municípios, em 24 estados brasileiros. A capacidade do parque fabril é de 100 milhões de ton/ano, promovendo 23 mil empregos diretos. A produção de cimento, em 2016 foi de 57 milhões de toneladas e o consumo aparente

foi, também, de 57 milhões de toneladas (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC, 2020).

O processo de fabricação de cimento compreende as seguintes etapas: extração de calcário (matéria-prima), através de processos de britagem; dosagem do material para obtenção de uma mistura contendo 90% de calcário e 10 % de argila. Nos silos (estruturas verticais que permitem a homogeneização da mistura) é obtida a farinha crua. A mistura é levada ao forno para início do processo de clínquerização com temperatura em torno de 1.450° C. O material é resfriado e passa por um processo de moagem, que envolve o clínquer, gesso, calcário e outras adições (LARUCCIA, 2014).

O cimento é aglomerante responsável por unir os demais insumos, sendo o elemento fundamental de ligação entre os agregados. Essa ligação é o que determina a resistência final do concreto (LARUCCIA, 2014). A produção de cimento causa impactos ao meio ambiente desde a extração da matéria-prima até sua disposição final, com a contaminação de solos e cursos d'água, assoreamento de rios e formação de material particulado, entre outros (MAURY; BLUMENSCHNEIN, 2012). Cerca de 5% a 7% das emissões mundiais de gás carbônico são provenientes da produção de cimento, sendo considerada uma das indústrias mais poluentes do setor da construção civil (FELIX; POSSAN, 2018). Assim, a busca por estratégias para minimizar os impactos causados pela produção de cimento reflete, diretamente, na redução dos impactos das indústrias de concreto.

2.1.4 Água

A água é essencial na mistura do concreto e seu controle é fundamental para se obter um produto de qualidade: atua como reagente químico indispensável na sua formação (reação de hidratação) e como agente refrigerante para conter a elevação da temperatura (reações exotérmicas), responsáveis pela causa das fissuras no concreto. A norma NBR 15900 (ABNT, 2009) determina a quantidade e qualidade da água para amassamento do concreto, uma vez que essa dosagem pode interferir na durabilidade e resistência material, e deve ser atentamente observada.

Sua proveniência pode ser de várias fontes: rede pública, fontes subterrâneas, natural de superfície, de captação pluvial, entre outras, desde que sejam realizados os ensaios estabelecidos pela norma. A água de esgoto, mesmo que tratada, é inadequada para a utilização no concreto e as salobras só devem ser utilizadas para concreto simples (não armado) após aferição por meio de testes que garantam sua viabilidade (ABNT, 2009).

Outro papel importante da água é na cura do concreto, processo técnico utilizado para desacelerar a evaporação, permitindo a completa hidratação do cimento. Para o concreto convencional, tradicionalmente, é considerado um limite de três dias para a cura, sete dias para o endurecimento e 28 dias para o desenvolvimento da resistência. (CABEZAS *et al.*, 2018; METHA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). A finalidade de uma cura é garantir que o concreto atinja as condições projetadas de carga.

Quando a cura não é feita de maneira apropriada, não há hidratação adequada do cimento ocasionando a formação de silicatos de cálcio hidratado, que influenciam nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, gerando fissuras e porosidade, acarretando um desempenho insatisfatório, em especial, referente à sua resistência à compressão. Quanto maiores os cuidados com a cura do concreto, melhor é o seu desempenho mecânico e a sua resistência às intempéries (FIGUEIREDO *et al.*, 2019).

Os maiores impactos relacionados à água são: esgotamento dos recursos hídricos e contaminação do lençol freático (águas rasas e subterrâneas) durante o processo produtivo (LARUCCIA, 2014). Além da água utilizada na produção do concreto há, ainda, aquela usada para a lavagem dos caminhões e equipamentos e no processo de cura, que se configuram em efluentes gerados pelo sistema de produto. Portanto, estudos devem ser desenvolvidos visando o aproveitamento dos efluentes e o reuso da água em indústrias de concreto a fim de diminuir o uso de água “limpa” para situações em que é possível utilizar água de reuso e, também, para evitar a contaminação de cursos de água por essas indústrias.

2.1.5 Aditivos

Os aditivos têm a capacidade de alterar propriedades do concreto melhorando sua qualidade nos seguintes aspectos: trabalhabilidade, resistência, compacidade, durabilidade, bombeamento e fluidez (autoadensável). Podem, também, aprimorar seu desempenho, em relação à permeabilidade, retração, calor de hidratação, tempo de pega (retardar ou acelerar) e absorção de água. Por exemplo, os concretos autoadensáveis usam aditivos superplastificantes. Já em obras muito distantes, é preciso empregar algum retardador de pega. No entanto, sua utilização requer cuidados, principalmente, em relação ao momento certo da aplicação, a forma de aplicar o produto e a dosagem exata (DUQUE, 2018). A norma NBR 11768 (ABNT, 2011) define os critérios para a incorporação de aditivos ao concreto.

A utilização de aditivos possibilitou um avanço na tecnologia do concreto. No entanto, o desempenho do aditivo depende do tipo de cimento utilizado, uma vez que eles variam

bastante em sua composição e podem modificar as propriedades do concreto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O uso de aditivos redutores de água e superplastificantes, podem produzir concretos mais duráveis, resistentes e sustentáveis, uma vez que permitem diminuir o consumo de cimento Portland nas dosagens de concreto, reduzindo custos de produção e melhorando os critérios de sustentabilidade (SCHEEREN *et al.*, 2017).

Os principais impactos ambientais gerados pelos aditivos estão associados a emissões atmosféricas. A quantidade de CO₂ e NO_x emitida para a produção de 1 kg de superplastificante é, apenas, um pouco menor que as emissões associadas à produção de cimento. Por outro lado, a quantidade de SO_x emitida para fabricar o superplastificante é, significativamente, maior. No entanto, como a quantidade de aditivo usado no concreto é muito menor quando comparada ao teor de cimento, essas emissões podem contribuir, significativamente menos, para o impacto ambiental geral da produção de concreto (VAN DEN HEEDE; BELIE, 2012), do ponto de vista do seu ciclo de vida, embora sejam relevantes quando avaliada, apenas, a indústria produtora dos aditivos.

O concreto, assim como os seus componentes, é amplamente utilizado na construção civil devido à sua aplicação diversa, tanto em construções (casas, prédios etc.), como em obras de saneamento básico e infraestrutura, contribuindo para o desenvolvimento das cidades e para o bem-estar da população. No entanto, é um produto que apresenta impactos relacionados aos insumos utilizados na sua confecção e aos resíduos gerados no seu processo produtivo. Assim, é importante fazer a avaliação dos impactos gerados no ciclo de vida do concreto, a fim de proporcionar o conhecimento necessário para a busca de alternativas em relação aos insumos utilizados, processos menos impactantes e melhor gestão dos resíduos produzidos.

2.1.6 O poste

Postes podem ser definidos como estruturas pré-fabricadas de concreto armado para sustentação de redes aéreas de distribuição de energia elétrica, iluminação pública, entre outras finalidades. As empresas que fabricam postes disponibilizam os produtos que proporcionam a infraestrutura necessária ao acesso à energia elétrica.

A produção dos postes, isto é, o processo que ocorre dentro da fábrica onde são finalizados, antes do transporte até o local de uso, envolve os seguintes insumos: concreto (areia, brita, cimento, água, com ou sem aditivos) e vergalhões de aço, para a confecção da

estrutura. Existem diversos tipos de postes de concreto, com formato quadrado ou redondo, que podem ser utilizados para iluminação, passagem de energia, sustentação e outros fins. Os postes de concreto são adequados para sustentação de redes de distribuição de energia, pois possuem um sistema de impermeabilização que faz com que sejam rígidos o suficiente e mais resistentes, uma vez que estão, diretamente, expostos às intempéries (MILANI *et al.*, 2012).

Existem normas da ABNT que determinam todos os critérios para a produção dos postes de modo a garantir sua qualidade e combater as manifestações patológicas mais comuns a esse tipo de produto, como: ataques químicos, abrasão e outras reações que agredem as armaduras e provocam a deterioração dos vergalhões (FUJIMOTO; HIGASHI; SAWADA, 2015), além de prolongar a vida útil em função do desgaste natural provocado pelas intempéries, adiando a substituição dos mesmos (YUAN; JIANG, 2012; TSUNEMOTO *et al.*, 2017).

Em condições climáticas diversas, o processo de deterioração dos postes acontece de maneira diferente em função do ambiente, o que leva à necessidade de observância às normas que regulamentam a sua produção (CERQUEIRA *et al.*, 2012). O atendimento aos padrões de qualidade pode contribuir para melhorar a resistência dos postes, também, em situações extremas: condições de fortes ventos, como os tornados (IBRAHIM; DAMATTY; ANSARY, 2017), e vibrações, como terremotos (CHEN; DAI, 2010).

Os postes utilizados para a sustentação de redes de distribuição de energia elétrica são fundamentais para a promoção do bem-estar da população. A sociedade depende cada vez mais da eletricidade, tanto individualmente (nas moradias), quanto coletivamente (nas indústrias). Uma simples queda no fornecimento de energia pode provocar consequências adversas: por exemplo, um semáforo que não funciona devido à ausência de energia elétrica pode ocasionar um acidente no trânsito, até mesmo ceifando vidas.

Assim, avaliar os impactos gerados na produção de postes é necessário para que esses produtos, tão importantes para a sociedade, por sustentarem as redes de distribuição de energia, possam ser produzidos de forma sustentável, do ponto de vista ambiental, econômico e social. Métodos e ferramentas que proporcionam essa avaliação, conduzem as indústrias de postes na escolha de insumos e processos produtivos menos impactantes e na gestão sustentável dos resíduos gerados no seu ciclo de vida.

2.2 Economia Circular: conceito, aplicações e possibilidades

O mundo tem sido guiado por um conceito econômico linear, onde os recursos são extraídos da natureza, processados, transformados em produtos e descartados após o uso. O

desafio é transformar a economia linear em uma economia mais próxima da circular, onde todos os resíduos gerados da utilização de produtos, possam ser reaproveitados, dentro da cadeia produtiva.

A economia circular é considerada regenerativa e restaurativa, pois mantém produtos em seu mais alto nível de utilidade e valor. Trata-se de um ciclo contínuo de desenvolvimento, baseado no *design Cradle to Cradle*, isto é, do berço ao berço, que elimina a ideia de resíduos, pois os leva para o início da cadeia, como matéria-prima. O conceito de economia circular defende a redução da extração de recursos primários em favor do material secundário fluindo através de *loops* internos. Os fluxos circulares dentro da economia visam manter os recursos em uso o maior tempo possível e limitar a eliminação final de resíduos (GEJER; TENNENBAUM, 2017).

No entanto, esse conceito vai além do simples reaproveitamento dos resíduos e é baseado em três princípios: a preservação e aprimoramento do capital natural, com o objetivo de controlar estoques finitos e equilibrar os fluxos de recursos renováveis; a otimização dos recursos, para que os produtos e materiais possam circular no mais alto nível de utilização, durante o maior tempo possível, tanto no ciclo técnico, quanto no biológico; e a estimulação da efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o início do ciclo produtivo (SANTIAGO, 2016).

Nas últimas décadas, práticas de gestão da cadeia de suprimentos foram desenvolvidas para tentar reduzir as consequências negativas dos processos de produção e consumo, no meio ambiente. Paralelamente a isso, o discurso da economia circular foi propagado na literatura de economia industrial e de produção e, ultimamente, nos negócios e na prática (NASIR *et al.*, 2017). Os ideais dos princípios da economia circular enfatizam a ideia de transformar os produtos de forma que existam relações viáveis entre sistemas ecológico e econômico (CE100 BRASIL, 2017).

Para isso existem ferramentas e guias que auxiliam na implementação desse conceito como o BS 8001:2017 (2017), primeiro guia padrão para implementação dos princípios da economia circular nas organizações. Pauliuk (2018) faz uma avaliação crítica da norma de economia circular BS 8001:2017 e sugere um painel de indicadores quantitativos para sua implementação nas organizações, o que auxilia a mudança de paradigma, de uma economia linear, para o modelo circular que promove crescimento econômico, aliado à sustentabilidade ambiental e social.

O crescimento econômico refere-se ao aumento do Produto Interno Bruto (PIB), que é calculado através da soma de todos os produtos e serviços finais de uma região durante um

determinado período. O conceito de desenvolvimento econômico é bem mais amplo e relaciona-se à melhoria da qualidade de vida da população. Desse modo, desenvolvimento econômico pode ser definido como atividades que expandem as capacidades para realizar o potencial de indivíduos, empresas ou comunidades que contribuem para o avanço da sociedade através da produção responsável de bens e serviços. Sem desenvolvimento econômico, o crescimento econômico é limitado (FELDMAN *et al.*, 2016) e, muitas vezes, carrega injustiças históricas e sociais.

Os resultados do desenvolvimento econômico são maior prosperidade e mais qualidade de vida, que podem ser alcançados através de inovações sustentadas, melhora na infraestrutura, educação e oportunidades para a sociedade. Nesse contexto, um cenário favorável à prática de uma economia mais circular pode contribuir com o desenvolvimento econômico, promovendo uma sociedade mais justa, uma vez que a melhoria na gestão dos processos produtivos diminui o desperdício, aumentando o nível de rendimento econômico, refletindo na melhoria da qualidade do meio ambiente e, conseqüentemente, da qualidade de vida da população.

Um dos modelos para aplicação da economia circular é a simbiose industrial, cujo conceito é a criação de parques industriais com resíduo zero. É uma iniciativa que tem levado diversas empresas a rever suas estratégias, motivadas pela redução dos custos de disposição de resíduos e as preocupações sobre a degradação ambiental. O principal atrativo desse conceito é a relação mutualmente benéfica entre empresas integrantes de um ecossistema industrial, onde uma indústria aproveita os resíduos de outra, como novos insumos para processos produtivos buscando a harmonia entre os aspectos sociais, ambientais e econômicos (SANTOLIN; CATEN, 2015).

Outra maneira de melhorar o desempenho das empresas, em direção a uma economia mais circular, é a utilização de tecnologias da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (sensores, código de barras, *smart phones*), os Sistemas *Cyber*-físicos (controladores e sistemas de sensores), a Computação em Nuvem (internet, comércio virtual), a Fabricação Aditiva e Digital (impressoras 3D), *Big Data*, *Blockchain* e Inteligência Artificial. Os avanços nas tecnologias de manufatura digital possibilitam a circularidade mais eficiente dos recursos, dentro da cadeia produtiva, e contribuem para a tomada de decisão, tendo como base a gestão sustentável das operações nas indústrias (JABBOUR *et al.* 2018).

O setor de serviços, também, tem o potencial de desempenhar um papel importante na mudança para uma economia mais circular, devido à sua posição estratégica entre fabricantes e usuários finais. As empresas orientadas a serviços podem implementar os princípios da economia circular, na prática diária de negócios, ao mudar o foco da abordagem orientada para

o produto, para um *design* ecológico centrado no cliente, identificando, avaliando e priorizando modelos de negócios inovadores e sustentáveis em direção à uma economia mais próxima da circular (HEYS *et al.* 2018).

No caso dos postes, são produtos que contribuem para o fornecimento e distribuição de energia elétrica para a sociedade. Nesse sentido, os postes podem ser considerados *Product as a Service* (PaaS), uma vez que são produtos físicos utilizados no fornecimento de um serviço essencial para todos. A economia circular procura realinhar processos, em todos os campos da indústria, para apoiar a preservação de matérias-primas dentro de ciclos econômicos fechados. Dentro dessa estrutura conceitual, os PaaS combinam o uso de produtos tangíveis, com serviços intangíveis, para melhorar o desempenho dos sistemas produtivos, limitando o uso de materiais e outros recursos (AZCARATE-AGUERRE; DEN HEIJER; KLEIN, 2017).

Assim, a literatura científica aponta que a aplicação da economia circular não é algo simples, mas é possível. Existem ferramentas, como a ACV, que podem auxiliar nesse processo. Para isso, há necessidade de engajamento por parte das indústrias, da sociedade, colaboração do governo por meio de políticas públicas que favoreçam essa aplicabilidade e empenho na busca por processos produtivos mais sustentáveis que possam reduzir os impactos ambientais negativos e potencializar os impactos socioeconômicos positivos, na busca de uma sociedade mais justa.

2.2.1 Economia circular na construção civil e na mineração de brita

O conceito de economia circular na construção civil, está, ainda, em sua infância, e tem sido limitado à minimização e reciclagem de resíduos, apenas. No entanto, a economia circular deve ser pensada a partir de uma perspectiva de sistemas, incluindo novas formas de modelos de negócios, que permitam o aproveitamento de valores residuais dos materiais. Para incentivar a implementação dos princípios de uma economia mais circular, em toda a cadeia da construção, o contexto econômico deve ser considerado, apoiado por métricas, ferramentas e orientação (ADAMS, *et al.*, 2017).

O ciclo de vida da brita na construção civil inicia-se com a extração dos recursos minerais. Os agregados para construção civil, como a brita, são o primeiro elo da cadeia produtiva, nesse setor, e, desde que possam ser extraídos com custos ambientais aceitáveis, minimizando a perda de um recurso não renovável, pode haver uma contribuição do setor de mineração para os objetivos da economia circular

A transição para uma economia mais circular exige mudanças no cenário ao longo das cadeias de valor, tais como, a criação de novos modelos de negócios e de mercado, utilização da capacidade de ciclo reverso de produtos, além de proporcionar condições para o desempenho intersetorial. Essas ações estão relacionadas com todas as indústrias, incluindo a indústria da construção. O aumento da demanda por materiais de construção exige uma maneira alternativa de desenvolver ou aproveitar materiais de diferentes fontes (SMOL *et al.*, 2015).

A integração de princípios da economia circular, dentro da gestão sustentável da cadeia de suprimentos, pode fornecer vantagens claras a partir do ponto de vista ambiental. Os ganhos ambientais podem ser alcançados através dos princípios da economia circular, como, por exemplo, o controle dos estoques finitos de recursos naturais e otimização do uso dos mesmos, em relação aos tradicionais lineares sistemas de produção (MONTEIRO; SILVA, 2018; NASIR *et al.*, 2017).

Em relação à mineração de brita, a aplicação dos princípios da economia circular, referentes à otimização e aprimoramento do uso do capital natural, mostra que o gerenciamento proativo e preventivo dos resíduos de mineração fornece benefícios ambientais significativos, gerando valor com o material que seria desperdiçado das minas, levando ao entendimento de que existe a possibilidade de aplicabilidade prática de uma economia mais circular nas operações de mineração (LEBRE; CORDER; GOLEV, 2017).

Salemdeeb, Al-Tabbaa e Reynolds (2016) afirmam que, para alcançar uma proximidade dos objetivos da economia circular, é necessário haver maior compreensão dos vínculos entre a atividade econômica e a geração de resíduos. Os mesmos autores afirmam que os setores de construção, mineração e pedreiras têm as maiores taxas de geração de resíduos, que podem ser reaproveitados através da reciclagem.

A implementação da economia circular em todo o mundo, tanto de forma geral, como na construção civil, ainda parece estar focada, principalmente, em reciclar. Resultados importantes foram alcançados em alguns setores de atividade, onde grandes taxas de reciclagem de resíduos são alcançadas, em países desenvolvidos, como Japão, EUA e países da União Europeia (UE) (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Schneider *et al.* (2017), por outro lado, em um estudo desenvolvido no Vietnã, concluíram que, geralmente, existe um grande potencial para economia circular em países de baixa renda, uma vez que, a principal proporção dos fluxos de resíduos, são recicláveis.

Na Itália, foi feito um estudo para selecionar, entre duas tecnologias diferentes, a solução mais viável para um projeto de fachada de vidro de construção multifuncional. De acordo com

os princípios do pensamento do ciclo de vida e da economia circular, o estudo pressupõe que as fases de gerenciamento de construção e o estágio de fim de vida (*Design for Disassembly - DfD*) devem ser considerados conjuntamente, isto é, as decisões iniciais de investimento dependem das soluções de *design*, desde os primeiros estágios relacionados ao ciclo de vida completo do edifício (FREGONARA *et al.*, 2017).

Outro país que empregou o conceito de economia circular para gerenciar os resíduos de construção foi a Malásia. De acordo com Esa, Halog e Rigamonti (2017), os resíduos devem ser gerenciados ao longo do ciclo de construção. O conceito de economia circular é uma noção emergente que tem potencial para ser utilizada como abordagem de minimização de resíduos, considerando-o como um fator chave para mitigar os impactos ambientais. As estratégias de minimização de resíduos, devem considerar todos os estágios, no setor da construção, ou seja, planejamento, concepção, aquisição, construção e demolição.

No Brasil, alguns projetos circulares começam a surgir no setor de edifícios e construção. No estado do Tocantins, foi desenvolvida uma tecnologia de recuperação de materiais, a partir de resíduos de construção e mineração para produzir blocos modulares que possibilitam a construção de edifícios modulares a baixo custo. Devido à modularidade e flexibilidade, os edifícios podem ser reformados e reconstruídos, sob demanda, diminuindo o tempo de construção e limitando a produção de resíduos (CE100 BRASIL, 2017).

O gerenciamento sustentável de materiais, produtos e resíduos em obras de construção contribui para a eficiência dos recursos e reciclados de qualidade. Envolve a adoção de medidas para prevenção e segregação dos resíduos inevitáveis e coleta separada. Essa gestão sustentável enquadra-se na estratégia europeia para a competitividade do setor, através do plano de ação da União Europeia (EU) para a economia circular, e os objetivos da UE em matéria de resíduos de construção e demolição (RIVERO; BAEZ; NAVARRO, 2017).

O uso eficiente de matérias-primas e recursos é um desafio que a sociedade enfrenta. Neste contexto, o setor da construção civil deve se adaptar às novas tendências e aos sistemas de construção sustentáveis do ponto de vista ambiental. Isto pode ser conseguido através da produção de materiais estruturais alternativos a serem utilizados na indústria da construção por meio de uma economia mais circular (GARCÍA; GARCÍA; PALOMINO, 2017).

Conforme observados, diversos estudos têm sido conduzidos na busca da aplicação da economia circular no setor da construção civil. Os resultados apontam as diversas formas de em que o conceito pode ser aplicado, levando a uma mudança de paradigma na atividade que, ainda, é realizada tendo em vista o modelo linear de economia (extração – produção – uso – descarte). O comprometimento entre o tripé indústria/sociedade/governo pode contribuir com

esse avanço, direcionando a aplicação da economia circular, nesse setor, trazendo benefícios econômicos, ambientais e sociais, globalmente.

2.2.2 Entraves na aplicação da economia circular

Kirchherr, Reike, Hekker (2017) atestam que a economia circular é, frequentemente, representada como uma combinação de atividades de redução, reutilização e reciclagem, ao passo que, muitas vezes, não é enfatizada a necessidade de uma mudança sistêmica. Além disso, as principais definições de economia circular demonstram poucas ligações explícitas do conceito com o desenvolvimento sustentável.

O objetivo da economia circular está relacionado, principalmente, à prosperidade econômica aliada à qualidade ambiental, no entanto o impacto na equidade social e nas gerações futuras é, ainda, pouco enfatizado. Assim, é necessário que os modelos de negócios e os consumidores tornem-se facilitadores da aplicação de uma economia mais circular para que não haja, eventualmente, o esgotamento do conceito (KIRCHHERR; REIKE; HEKKER, 2017).

Um dos desafios na aplicação da economia circular é a disponibilidade de parques industriais onde as indústrias possam compartilhar seus resíduos com outras, fazendo os produtos circularem dentro da cadeia de valor o maior tempo e com maior aproveitamento possível (BELLANTUONO; CARBONARA; PONTRANDOLFO, 2017). A logística de transporte de resíduos de uma indústria para outra pode tornar o reaproveitamento dos resíduos inviável em função da localização e distância entre as indústrias envolvidas. Esse fato pode ser, particularmente, importante para países de dimensões continentais, como o Brasil.

Em relação à reciclagem, as dificuldades estão no âmbito tecnológico e econômico. Muitas vezes, as melhores técnicas não estão disponíveis a preços viáveis, tornando a reciclagem um processo economicamente desinteressante. É preciso, também, quantificar a demanda de água e energia do processo de reciclagem em relação à extração da matéria-prima bruta, além do custo de máquinas e equipamentos, a fim de avaliar a sua viabilidade econômica e ambiental.

Entre os problemas enfrentados pelos países em desenvolvimento, como a China, está o grande volume de resíduos recebidos dos países desenvolvidos, para reciclagem, que, muitas vezes, são de baixa qualidade. Em uma economia circular global, os países desenvolvidos devem ajudar os países em desenvolvimento a lidar com as questões ambientais, causadas pela reutilização de resíduos, transferindo tecnologias de gestão e reciclagem de resíduos e investindo em treinamento de funcionários locais para mitigar possíveis riscos ambientais. As

exportações de materiais recicláveis dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento não devem ser, simplesmente, a transferência de poluição, ao contrário, devem ser parte da busca de uma economia mais circular, a nível global (LIU; ADAMS; WALKER, 2018). É preciso cuidado para não confundir a circularidade de produtos e resíduos com deslocamento de poluição de um lugar privilegiado (países desenvolvidos) para países mais pobres.

Sobre a reciclagem de agregados, especificamente, os maiores problemas podem estar relacionados à qualidade dos agregados reciclados. Devido à qualidade inferior, muitos agregados reciclados não podem ser utilizados em qualquer tipo de edificação ou em substituição à brita e areia. Ortiz; Tauta e León (2013) observam que a origem do agregado influencia na qualidade do asfalto, com destaque para a granulometria e densidade. Portanto, a substituição deve ser feita levando em conta esses fatores técnicos, para que a qualidade do produto final não fique comprometida.

Outro fator determinante na busca pela aplicação de uma economia mais circular é a cooperação do governo, através de incentivos fiscais, que possam reduzir as barreiras tarifárias, no setor. A tributação, normalmente, representa um alto custo para a mineração, que é o primeiro elo na cadeia produtiva da brita, no setor da construção civil. Esse alto valor pode ser positivo, no sentido de inibir a exploração, mas pode comprometer a circularidade no setor. Na Austrália, por exemplo, havia uma taxa sobre o lucro da mineração, criada em 2012 para financiar programas sociais, que foi retirada pelo governo, a fim de manter o emprego e a competitividade mundial da indústria de mineração australiana (TAKANO; FLORES; LIMA, 2016). Fato pensado, unicamente, no lucro das mineradoras, desconsiderando as questões sociais e de governança, tão importantes para incentivar a sustentabilidade no setor.

No Brasil, ao contrário, a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017 (BRASIL, 2017), provocou o aumento na taxa de arrecadação da CEFEM, que passou a incidir sobre a receita bruta da venda dos produtos de mineração, o que pode levar à diminuição da competitividade do segmento mineral brasileiro, no contexto mundial. O lado positivo do aumento de impostos é que, de certa forma, essa situação pode limitar a exploração, levando à diminuição dos impactos ambientais causados pela atividade. O incentivo fiscal, no contexto brasileiro, se estabelecido, não pode objetivar apenas a competitividade internacional, mas também deve ser discricionário para indução de uma busca de uma maior circularidade no setor, possibilitando o direcionamento de investimentos para uma economia mais circular.

Tingley, Cooper e Cullen (2017) propõem quatro mecanismos para superar as barreiras sistêmicas, enfrentadas na adoção das práticas que se aproximem da economia circular: (1) a

criação de um banco de dados de fornecedores com disponibilidade de material reutilizável e reciclável, (2) a demonstração de demanda, (3) orientação técnica e educação para a indústria e (4) liderança do governo. Juntos, esses mecanismos tendem a melhorar o desempenho econômico das organizações, promover a justiça social e reduzir os impactos ambientais, criando cenários favoráveis à aplicabilidade de uma economia mais próxima da circular.

Os entraves na aplicação da economia circular são muitos, conforme descrito nos estudos que buscam pontuar as dificuldades em relação ao avanço da aplicação do modelo circular de economia. Portanto, há necessidade de empenho para que o conceito não fique, apenas, na teoria, mas possa ser empregado de forma prática, contribuindo para a circularidade de resíduos nas cadeias produtivas, diminuindo seu acúmulo no ambiente. O resultado dessa aplicação se reflete em sustentabilidade ambiental, econômica e social.

2.3 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das ferramentas que possibilita a identificação e mensuração dos potenciais impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços, ao longo do seu ciclo de vida. Os impactos são avaliados desde a aquisição da matéria-prima, passando pela produção, pelo uso e pela disposição final (ABNT, 2014). Essa ferramenta é regulamentada pelas normas NBR 14040 (ABNT, 2014) e NBR 14044 (ABNT, 2014a), podendo ser utilizada para subsidiar a identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de produtos, auxiliar a tomada de decisão, quanto a viabilidade ambiental de um produto, escolha do tipo de processos produtivos e matérias-primas menos impactantes ao meio ambiente, além de orientar o *marketing*, melhorando a apresentação do produto do ponto de vista ambiental (ABNT, 2014).

De acordo com a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), a análise é feita mediante um inventário de entradas e saídas do sistema do produto; a avaliação dos impactos relacionados a essas entradas e saídas; e, por fim, é feita a interpretação dos resultados em função dos objetivos do estudo. Assim, um estudo de ACV é um processo iterativo, composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e fase de interpretação.

Há muitas outras normas da ABNT relacionadas à ACV: ISO/TS 14017 (ABNT, 2019), que fornece princípios, requisitos e diretrizes para o desenvolvimento, análise crítica, registro e atualização de Regra de Categoria de Produtos (RCP) em uma declaração ambiental ou em um programa de comunicação de pegada, baseado na ACV; ISO/TS 14071 (ABNT, 2018), que

fornece especificações adicionais para as NBR ISO 14040 e 14044, como requisitos e diretrizes para a realização de uma análise crítica de qualquer tipo de estudo de ACV; NBR ISO 14046 (ABNT, 2017), que especifica princípios, requisitos e diretrizes relacionados com a avaliação da pegada hídrica de produtos, processos e organizações com base na ACV; e ISO/TR 14047 (ABNT, 2016), que contém exemplos ilustrativos de como aplicar a NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto.

Além dessas, existem duas normas europeias relativas à ACV, aplicadas ao contexto da construção civil: *British Standard* EN 15978:2011 (BS, 2011) e *British Standard* EN 15804:2019 (BS, 2019). A EN 15978 especifica o método de cálculo, com base na ACV, para avaliar o desempenho ambiental de um edifício e fornece os meios para comunicar o resultado da avaliação (BS, 2011). A EN 15804 fornece regras de categoria básicas para produtos e serviços de construção, além de uma estrutura para garantir que todas as Declarações Ambientais de Produto (DAP) de produtos, serviços e processos de construção sejam derivadas, verificadas e apresentadas de forma harmonizada, a fim de possibilitar a comunicação de informações ambientais verificáveis, precisas e não enganosas, apoiando, assim, escolhas justas, com base científica, estimulando o potencial de melhoria ambiental contínua (BS, 2019).

A ferramenta ACV pode ser utilizada para a avaliação ambiental de diversos tipos de produtos e serviços. Na construção civil, é usada no contexto de produção de concreto (INGRAO *et al.*, 2014; KIM; TAE, 2016), cimento (VALDERRAMA *et al.*, 2012), pavimentação de estradas (JULLIEN; DAUVERGNE; CERESO, 2014), construção de pontes (DU *et al.*, 2014), construção de rodovias (FERREIRA *et al.*, 2016), produção de postes (SOUZA *et al.*, 2017), produção de brita (ROSSI, 2013), entre outros. Aplicando as normas europeias, a ACV foi utilizada na avaliação dos impactos do carbono na reconstrução de edifícios do ensino superior (HAWKINS; MUMOVIC, 2017), avaliação ambiental de produtos cimentícios (CALDAS; TOLEDO FILHO, 2018), edifícios sustentáveis com custo mais baixo (BRAGANÇA; VIEIRA; ANDRADE, 2014), reciclagem de produtos de construção compostos (VLADMIROV; BICA, 2019), entre outros.

Assim, a ACV, bem como as normas que regulamentam o seu uso, auxilia na tomada de decisões quanto a viabilidade ambiental de um produto, escolha do tipo de processos produtivos e matérias-primas menos impactantes ao meio ambiente. A ferramenta é adequada para avaliar ambientalmente produtos como o concreto e o poste, pois permite a mensuração de todos os impactos relativos ao ciclo de vida desses produtos.

Esse estudo preenche uma lacuna na produção científica sobre fabricação de concreto e postes pois existem poucos trabalhos que abordam os impactos ambientais gerados por essas

indústrias, na mesma perspectiva dessa pesquisa. Além disso, não foram encontrados, na literatura científica, estudos que tratam dessa abordagem no Nordeste, especialmente, no Piauí e em Teresina. Assim, esse trabalho contribui com esse conhecimento, gerando subsídios que podem ser aplicados em outras partes do Brasil e do mundo.

2.3.1 Métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A disponibilidade de diversas fontes para os bancos de dados de ICV e a diversidade de métodos de AICV contribui para melhor executar os estudos de ACV. Tradicionalmente, os métodos são entendidos como um conjunto de categorias de impacto da AICV e sua escolha é feita antes de calcular um sistema ou projeto de produto, tendo em vista o que melhor se adapta às necessidades do estudo. Os modelos e fatores de caracterização contidos nos métodos de AICV são os meios para avaliar a significância ambiental dos resultados do inventário (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2016).

Os métodos de AICV foram desenvolvidos por diversas instituições ao redor do mundo: CML (Holanda), Eco-Indicator 99 (Holanda), EDIP 2003 (Dinamarca), EPS 2000 (Suécia), Impact 2002+ (Suíça), TRACI (EUA), LIME (Japão), LUCAS (Canadá) (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016) e estão disponíveis nos *softwares* utilizados nos estudos de ACV, como SimaPro, Umberto, GaBi, entre outros. No Quadro 1 estão descritas as categorias de impacto mais comuns que podem ser encontradas nos diferentes métodos disponíveis no OpenLCA, que é um *software* gratuito, de código aberto, amplamente utilizado para fins de estudos de ACV.

Não há um método elaborado para as condições do Brasil, o que dificulta a seleção entre os existentes. Assim, uma das formas de reduzir as incertezas em estudos brasileiros é por meio da escolha de mais de um método de AICV, garantindo maior confiabilidade aos resultados (PIEKARSKI *et al.*, 2012). A escolha de diversos métodos, com diferentes abordagens para a quantificação dos impactos possibilita diferentes interpretações (SOUZA, 2014).

No Brasil, existem grupos de pesquisa que trabalham no desenvolvimento e adaptação de métodos de AICV para o contexto brasileiro. O Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) é um banco de dados criado para abrigar Inventários do Ciclo de Vida (ICVs) de produtos nacionais/regionais. O sistema é um gerenciador de bases de dados que visa um conjunto consolidado dos inventários brasileiros, o que implica diretamente no aumento da competitividade da indústria nacional vinculado a um melhor desempenho ambiental de produtos e serviços (ACV-IBICT, 2020).

Quadro 1 – Categorias de impacto disponíveis nos diversos métodos de AICV

Método	Acidificação	Mudança climática	Depleção de recursos	Ecotoxicidade	Uso de energia	Eutrofização	Toxicidade humana	Radiação ionizante	Uso da terra	Odor	Depleção da camada de ozônio	Material particulado/ Inorgânicos respiratórios	Oxidação fotoquímica
CML (baseline)	X	X	X	X		X	X				X		X
CML (non baseline)	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X
ReCiPe Endpoint (E) (H) (I)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
ReCiPe Midpoint (E) (H) (I)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
Cumulative Energy Demand					X								
Eco-indicator 99 (E) (H) (I)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	
Eco-Scarcity 2006			X										
ILCD 2011, Endpoint	X	X				X	X	X	X		X	X	X
ILCD 2011, Midpoint	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
TRACI 2.1	X	X	X	X		X	X				X	X	X
USEtox				X			X						

Fonte: Adaptado de Acero, Rodríguez e Ciroth (2016)

Na norma EN 15804:2019 (ES, 2019) são indicados diferentes métodos para a avaliação de impactos de produtos da construção civil, de acordo com a categoria abordada. Além dos métodos, na norma estão indicadas as categorias de impacto que devem ser avaliadas em estudos de ACV de materiais de construção civil. Para o contexto brasileiro, os métodos que mais têm sido utilizados em trabalhos recentes (anos 2019/2020), baseados na norma EN 15804:2019, são o ReCiPe Midpoint (H) e o CML (*baseline*) (MORALES, *et al.*, 2019; PASSUELO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020a; SILVA *et al.*, 2020b).

Um dos motivos da maior utilização desses métodos (CML e ReCiPe) é que, por exemplo, para analisar a categoria aquecimento global, a norma EN 15804:2019 (ES, 2019) recomenda o uso do método IPCC, cujos fatores de caracterização são os mesmos utilizados pelo método ReCiPe, não havendo diferença entre os resultados dos dois métodos (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Nesse caso, o uso do ReCiPe é mais viável pois contém outras categorias que devem ser analisadas, segundo a norma.

Existem várias razões pelas quais se pode escolher um método de impacto em vez de outro. Os critérios a serem considerados incluem: abrangência (global/regional?), robustez (quão incertos são os impactos calculados?), compreensibilidade (o público pode entender o método?), abertura (é preciso pagar para usar o método?), atualidade (o método está desatualizado?), etc. A resposta a essas perguntas pode auxiliar na escolha do melhor método para o caso em estudo.

Nesse trabalho, foram utilizados dois métodos de AICV, que foram utilizados individualmente, ou simultaneamente, dependendo do objetivo e do objeto em estudo: o CML (*baseline*) e ReCiPe *Midpoint* (H). O método CML *baseline* foi selecionado, tanto para o estudo do concreto, como para o estudo do poste, pois apresenta um escopo de aplicação global para todas as categorias abordadas, com exceção para acidificação e formação de oxidantes fotoquímicos. Este método foi criado pela Universidade de Leiden, na Holanda, em 2001, contendo mais de 1.700 fluxos diferentes e foi publicado em um manual com vários autores (GUINÉE *et al.*, 2002).

O método CML é dividido em *baseline* e *non baseline*, sendo que o primeiro contém as categorias de impacto mais comuns, usadas na ACV, e é indicado por Mendes, Bueno e Ometto (2016) para utilização em estudos desenvolvidos no Brasil, por sua abrangência global de aplicação. Como não existe uma metodologia adaptada ao contexto brasileiro, torna-se necessário escolher aquela que possa atender adequadamente os critérios de aplicabilidade no Brasil.

O ReCiPe foi escolhido para o estudo do concreto, por ser um método que integra e harmoniza as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura comum e consistente (STAFFORD *et al.*, 2016). Foi desenvolvido em 2008 com o objetivo de combinar os métodos Eco-Indicator 99 e CML, em uma versão atualizada. O ReCiPe distingue dois níveis de indicadores: indicadores de ponto médio (*midpoint*) e indicadores de ponto final (*endpoint*) com as seguintes categorias: danos à saúde humana, danos aos ecossistemas e danos à disponibilidade de recursos (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2016).

Cada abordagem do ReCiPe (*midpoint* e *endpoint*) contém fatores de acordo com três perspectivas culturais, que representam um conjunto de opções, como tempo ou expectativas de que o gerenciamento adequado, ou o desenvolvimento da tecnologia, possam evitar danos futuros: (I) *Individualist* (individualista): curto prazo, otimismo de que a tecnologia pode evitar problemas no futuro; (H) *Hierarchist* (hierarquista): modelo de consenso, frequentemente, encontrado em modelos científicos e, geralmente, considerado o modelo padrão; (E) *Egalitarian* (igualitário): longo prazo, baseado no pensamento do princípio da precaução. É bastante utilizado em trabalhos desenvolvidos no Brasil, apresentando escopo de aplicação global para as categorias de impacto: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio e consumo de recursos (HUIJBREGTS, *et al.* 2017).

Os métodos utilizados, nesse estudo, para a AICV possibilitaram o conhecimento dos potenciais impactos associados à fabricação de concreto e postes, auxiliando na indicação de melhorias na gestão do ciclo de vida desses produtos. A tomada de decisão entre insumos alternativos que gerem menor impacto, processos produtivos mais eficientes e gestão dos resíduos e efluentes gerados, é possível uma vez que os resultados encontrados, com o auxílio dos métodos utilizados, permitem a tomada de decisão mais assertiva em relação à sustentabilidade (ambiental, econômica e social).

2.4 Gestão do Ciclo de Vida (GCV)

A mudança de paradigma no mundo dos negócios, de uma visão focada, essencialmente, no lucro, para uma abordagem mais equilibrada, que inclui os fatores ambientais, de governança e sociais, tende a se tornar um diferencial para que as empresas se mantenham competitivas no mercado global e no mercado doméstico. A Gestão do Ciclo de Vida (GCV) propõe a avaliação do ciclo de vida de produtos, processos e serviços, incluindo toda a cadeia a montante e a jusante do empreendimento. Isso vincula o gerenciamento da sustentabilidade e o desempenho de organizações e produtos à criação de valor.

Esse conceito absorve a economia de custos, gerenciamento de riscos e *compliance*³, integrando-os para que a sustentabilidade seja vista como um elemento de diferenciação no mercado (REBITZER, 2015). Assim, a GCV é um conceito e uma prática das empresas que incorpora a sustentabilidade como parte da rotina de seus negócios, fazendo com que o gerenciamento das questões socioambientais, em um contexto econômico, deixe de ser um custo de negócios, tornando-se um direcionador das atividades da empresa (MANDA; BOSCH; WORRELL, 2015).

A preocupação com a sustentabilidade gera uma série de atitudes no ambiente empresarial que promovem benefícios ambientais e sociais, uma vez que as indústrias começam a buscar alternativas para que seus processos produtivos provoquem a menor agressão possível ao meio ambiente. Mesmo os produtos, cuja GCV se mostram insustentáveis economicamente, na atualidade, podem, futuramente, ganhar mercado, quando a percepção das pessoas mudar sobre as questões ambientais. A lucratividade não se mede, apenas, quando há aumento da venda, mas, também, quando se adotam processos produtivos que promovem economia em termos de diminuição do desperdício de água/energia/resíduos, e atividades proativas relativas a questões ambientais e sociais.

A escolha das melhores ferramentas de aplicação da GCV depende do principal objetivo da empresa, sendo importante atentar para a comunicação com acionistas e partes interessadas, clientes, autoridades públicas, consumidores e fornecedores. Medeiros *et al.* (2018) demonstraram, em um estudo sobre a ferramenta *Life Cycle Canvas*, a viabilidade do uso de ferramentas de apoio, que podem promover gestão completa de um projeto em todas as etapas do seu ciclo de vida, confirmando a importância de escolher as ferramentas certas de acordo com os objetivos da empresa.

Dois grandes desafios para integrar a GCV nas organizações são a colaboração e a comunicação. Os profissionais do ciclo de vida precisam melhorar a colaboração global entre si e com os outros e se comunicar com um conjunto mais amplo de partes interessadas, a fim de aumentar a adoção de abordagens baseadas no ciclo de vida de produtos e serviços. É preciso, também, responder a uma variedade de questões e lacunas e haver um espaço para colaboração e comunicação em um conjunto compartilhado de ideias e princípios. Os membros da comunidade precisam ser capazes de se identificar facilmente com a empresa e estar interessados em se engajar nas questões ambientais (STROTHMANN *et al.*, 2015).

³ *Compliance*: significa agir de acordo com uma regra. Estar em conformidade com atos, normas, leis e regulamentos, externos e internos, para seu efetivo cumprimento (MAZAHIR; ARDESTANI-JAAFARI, 2020).

Outro desafio a ser superado é que, para implementar estratégias para mudar os padrões de consumo e produção, é preciso considerar as diferentes responsabilidades dos diversos atores da cadeia de valor, incluindo os consumidores. É preciso, também, a aplicação de políticas e normas, além de estabelecer sistemas de medição de desempenho (FONSECA; ROZENFELD, 2012). A comunicação profissional direcionada aos formadores de opinião e a colaboração entre especialistas e redes de ciclo de vida são, também, elementos importantes para a criação de valor sustentável (GOEDKOOOP *et al.*, 2015).

Embora o conceito possa ser aplicado em todo tipo de empresa, independente do porte (SONNEMANN *et al.*, 2015), um dos maiores desafios está em estabelecer a integração entre os diversos setores/departamentos, bem como entre os diferentes atores que fazem parte da cadeia produtiva. A GCV pode promover a colaboração entre os departamentos dentro da empresa e com as partes interessadas fora da organização. A melhoria contínua do desempenho ambiental é desafiadora e requer uma abordagem holística, interdisciplinar e colaborativa. Ferramentas de GCV, combinadas com processos de negócios internos adequados, fornecem uma base robusta para isso (ADAMS; SCHENKER; LOERINCIK, 2015).

A GCV tem sido empregada no gerenciamento de projetos de construção com o alvo de reduzir custos, tempo, risco e melhorar os serviços entregues. No entanto, devido à falta de uma plataforma de compartilhamento de informações eficaz, a GCV de projetos de construção não é usada de forma eficaz. Guo, Li e Skitmore (2010) propõem, com base na análise do fluxo de informações da GCV, uma plataforma de comunicação e colaboração baseada em prototipagem virtual, onde todo o processo de implementação da GCV é analisado por meio de um aplicativo. O estudo demonstrou que a plataforma de comunicação e colaboração baseada em prototipagem virtual é uma ferramenta eficaz para apoiar a GCV de projetos de construção.

Nesse trabalho, a aplicação do conceito de GCV, no contexto da fabricação de concreto e postes, possibilitou um avanço nas alternativas de gestão, especialmente, relacionadas à geração de resíduos. Os resíduos gerados por essas indústrias são potencialmente reaproveitáveis e podem servir de insumo para outras indústrias. A GCV permitiu a visualização das potencialidades econômicas, sociais e ambientais do reaproveitamento desses resíduos, contribuindo para o avanço rumo a uma sociedade mais justa.

3 METODOLOGIA

Primeiramente, foi feito o levantamento bibliográfico na literatura científica a fim de entender o setor de brita e da construção civil que utiliza esse insumo. A partir desse estudo, foi possível fazer uma revisão bibliográfica que resultou em dois artigos, que são os dois primeiros capítulos da tese.

3.1 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável na mineração e Direito minerário: em busca de uma mineração sustentável

Foi realizado um estudo sobre a aplicação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na mineração, com base na literatura científica e visitas a três indústrias de brita localizadas na região de Monsenhor Gil-PI. Em seguida, foi pesquisada a legislação existente para o setor mineral com o foco em algumas características peculiares do Direito Minerário brasileiro, analisando as Jurisprudências do Superior Tribunal de Justiça, a fim de entender como o direito minerário é aplicado, na prática.

3.2 Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em indústrias de concreto e postes

A segunda etapa da pesquisa envolveu visitas de campo, nas indústrias selecionadas, visando conhecer os processos produtivos para a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A pesquisa documental foi efetuada a partir de documentos públicos dessas indústrias e do setor industrial em que se inserem. Também foram identificadas experiências relevantes do setor, descritas na literatura científica.

Inicialmente, foi feito um levantamento das empresas a serem visitadas, para que fossem estabelecidas as fronteiras do sistema dos produtos a serem analisados, dentro do objetivo do estudo. Foi definida, como fronteira do sistema, berço a portão da atividade industrial, acrescido, a jusante, o transporte de produtos ao consumidor final e, a montante, o transporte de insumos até a indústria.

Foram elaborados questionários, orientados pelo Instrumento de Coleta de Dados (Apêndice A), contemplando todos os dados necessários para a construção do inventário, que visa identificar todas as entradas e saídas de um empreendimento. Fazem parte do universo de dados primários: consumo de combustível e energia; quantidade de máquinas e equipamentos; descrição dos processos; quantidade e tipo de resíduos e efluentes; entre outros. Os dados secundários são obtidos na literatura científica, em relatórios especializados do setor e na base de dados Ecoinvent 3.7.1.

Para cada produto foram definidos: a unidade funcional, bases de cálculos, valores de referência, categorias de impactos e demais considerações para a AICV. A modelagem foi feita no OpenLCA 1.8, *software* gratuito, de código aberto, amplamente utilizado para análises de ACV (OpenLCA, 2020). A base de dados utilizada foi o Ecoinvent 3.7.1 *Cut-Off unit regionalized*. Foram adotados dois métodos de AICV, ReCiPe *Midpoint* (H) e CML (*baseline*), utilizados de acordo com o objetivo do estudo de cada produto.

A análise de sensibilidade foi feita com a alteração dos seguintes parâmetros: reaproveitamento de resíduos e efluentes, simulação de diferentes distâncias para o transporte dos insumos até as indústrias, substituição da sílica ativa por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e diminuição do teor de cimento no traço do concreto. Foram identificadas as etapas com maior perda de material com potencial de ser reintegrado à cadeia produtiva, tendo em vista o conceito de economia circular.

Partindo de mudanças pontuais do cenário atual foram construídos cenários alternativos, exequíveis economicamente, para cada atividade industrial com o intuito de identificar as mudanças que são significativas do ponto de vista ambiental. A partir dessa avaliação, foram estabelecidas as fases em que é possível a aplicação da simbiose industrial, de acordo com as empresas envolvidas dentro da cadeia produtiva. Com as informações advindas da avaliação do ciclo de vida foi possível simular cenários realísticos sobre o impacto da mudança nos insumos, descartes e processos em direção à economia circular.

4 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA MINERAÇÃO⁴

Resumo

Em 2015, foram lançados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como parte de uma Agenda a ser atendida até 2030. O alvo é ter um plano de ação, de forma global, visando a paz universal e a justiça socioambiental. Para isso, foram traçadas 169 metas. O objetivo dessa pesquisa é discutir de que maneira a atividade de mineração pode ser desenvolvida em compatibilidade com os ODS. Para isso, foram utilizadas as bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, empregando-se as palavras-chave “*sustainable development goals*” e “*mining*”, e o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para a busca de trabalhos que relacionam cada um dos ODS com a mineração. Também, foram realizadas visitas à três indústrias de mineração de brita, localizadas na região de Monsenhor Gil, Piauí, Brasil, a fim de acompanhar o processo de extração, beneficiamento e comercialização do mineral diabásio. Além disso, foram analisados os estudos ambientais desenvolvidos para a obtenção de licença ambiental e mineral. Da pesquisa na literatura foi possível constatar que há diversas possibilidades de atingimento dos 17 ODS no setor minerário, como na promoção de empregos (ODS 8), contribuindo para a diminuição da pobreza (ODS 1) e fome (ODS 2), entre outros. Das visitas às mineradoras de brita, observou-se o atendimento aos ODS relacionados à promoção de empregos, melhoria na renda dos moradores da comunidade e na infraestrutura geral do entorno. No entanto, em função da natureza da atividade, existe uma pequena quantidade de mulheres inseridas no quadro de funcionários, configurando o desatendimento ao ODS 5, relativo ao alcance da igualdade de gênero, bem como a falta de investimentos em educação inclusiva para os funcionários e para os residentes da região. Além disso, essas indústrias não fazem a recuperação das áreas degradadas, comprometendo o atingimento do ODS 13, relativo à contenção das mudanças climáticas.

Palavras-chave: ODS; Impactos ambientais; Mineração de brita

4.1 Introdução

Em setembro de 2015, a Assembleia Geral das Nações Unidas aprovou um documento intitulado “Transformando o mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, com o objetivo de traçar um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a posteridade, visando fortalecer a paz universal por meio de uma parceria global. A Agenda apresenta 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, baseados nos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), lançados no ano 2000, para o combate à pobreza (UNITED NATION - UN, 2015).

A partir das metas estabelecidas pelos ODM, foram lançados os ODS, que contêm diretrizes de ação para a inclusão social, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento econômico. De forma geral, os ODS são a ampliação dos ODM e têm como objetivos

⁴ MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A.; MOITA NETO, J. M. Sustainable development goals in mining. *Journal of Cleaner Production*, v. 228, p. 509-520, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.332>

fundamentais erradicar a pobreza extrema, combater a desigualdade e a injustiça e conter as mudanças climáticas (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD, 2017).

Uma característica importante da Agenda 2030 é o reconhecimento de que o desenvolvimento social e econômico depende da gestão sustentável do meio ambiente natural e seus recursos (TERAMA *et al.*, 2016), o que oportuniza a implementação dos ODS em qualquer atividade econômica/industrial. Assim, o setor de mineração possui ampla capacidade de alcançar esses objetivos, por meio da mobilização de recursos econômicos e tecnológicos. Segundo Florkowska e Bryt-Nitarska (2018), a Agenda cria possibilidades para a implantação de uma maneira de produção e organização social mais cooperativa e solidária, com capacidade de promover justiça socioambiental.

Okado e Quinelli (2016), em uma avaliação sobre a interação entre as megatendências mundiais e os ODS, apontam dois desafios que prejudicam o seu cumprimento: a falta de parâmetros para um modelo de desenvolvimento sustentável e a falta de homogeneidade entre os países para fomentar iniciativas no sentido de melhorar e fortalecer a governança global. O comprometimento dos governos em garantir o cumprimento das leis relativas à elaboração de estudos ambientais (obrigatórios para atividades de mineração) e o cumprimento dos seus requisitos representa um caminho promissor para que o setor contribua para o alcance dos objetivos e metas de desenvolvimento sustentável, de maneira global (PFEIFFER *et al.*, 2017).

Assim, o objetivo desse trabalho é discutir de que maneira a atividade de mineração pode ser desenvolvida em compatibilidade com os ODS. A pesquisa foi feita com base nas publicações científicas sobre a sustentabilidade ambiental na mineração, além de visitas à três indústrias de mineração de brita, que contribuíram para a construção dos argumentos. Os resultados apontam para as diversas possibilidades de aplicação dos ODS no setor de mineração, bem como as práticas que podem tornar a atividade ambiental, social e economicamente sustentável.

4.2 Metodologia

Foi realizada uma pesquisa sistemática na literatura científica com o intuito de recuperar as publicações que relacionam os termos utilizados para a elaboração dos ODS e a atividade de mineração. Para isso, foram utilizadas as bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, empregando-se as palavras-chave “*sustainable development goals*” e “*mining*”. Além disso, foi utilizado o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

(CAPES) que oferece uma pesquisa mais abrangente, pois contempla várias bases de dados, para a busca de trabalhos que relacionam cada um dos ODS e a mineração.

Para a pesquisa específica sobre cada objetivo, foram selecionadas palavras-chave de acordo com o tema principal do ODS, como demonstrado na Tabela 1 da seção “Resultados e discussão”. A pesquisa foi feita utilizando o recurso “busca avançada” e selecionando o campo “assunto”. Também foi utilizado o filtro “data de publicação” a fim de recuperar as publicações recentes.

Adicionalmente, foram utilizados os documentos “*Mapping Mining to the Sustainable Empowered lives. Resilient nations. Development Goals: an Atlas*” (WORLD ECONOMIC FORUM, 2016) e a versão, do mesmo, em português “Atlas: Mapeando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Mineração” (PNUD, 2017), que fornece algumas informações complementares, não contempladas no documento original. Ambos trazem um panorama técnico sobre a relação entre os ODS e a mineração.

Para o conhecimento pontual e exemplificativo de um tipo de atividade minerária foram feitas visitas à três indústrias de mineração de brita, localizadas em Monsenhor Gil, Piauí, Brasil, onde foram acompanhados os processos de extração, beneficiamento e comercialização do mineral diabásio. Além disso, foram acessados os estudos ambientais elaborados para a obtenção de licença ambiental e mineral desses empreendimentos, como determinado na legislação brasileira. Durante as visitas foi possível conhecer os impactos ambientais e sociais dessa atividade e identificar medidas de atendimento aos ODS nesse ramo específico de mineração.

4.3 Resultados e discussão

Na primeira parte da pesquisa, foram recuperados 32 trabalhos na base de dados *Scopus* e 17 resultados na base *Web of Science*, que relacionam os ODS com a atividade de mineração. Em ambas as bases, além de artigos científicos, foram encontrados artigos de conferência, capítulos de livro, entre outros. Da pesquisa específica por objetivo, a quantidade de artigos recuperados, para cada palavra-chave, está indicada na Tabela 1. A justificativa sobre a escolha dessas palavras-chave está descrita nos resultados de cada um dos ODS, de forma detalhada.

A partir das publicações científicas e da observação direta da rotina de três mineradoras de brita, foi possível propor ações de atendimento a cada um dos ODS que compõe documento lançado pela ONU, intitulado “Transformando o mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”.

Tabela 1 – Quantidade de artigos encontrados no portal da CAPES para cada ODS

Objetivo	Palavra-chave	Quantidade
ODS 1	<i>mining AND poverty</i>	72
	<i>“ore mining” AND agriculture</i>	15
ODS 2	<i>“mining site” AND “soil contamination”</i>	3
	<i>“mining site” AND “water contamination”</i>	14
ODS 3	<i>mining AND welfare</i>	27
ODS 4	<i>“ore mining” AND education</i>	14
ODS 5	<i>“ore mining” AND women</i>	25
ODS 6	<i>mining AND sanitation</i>	32
ODS 7	<i>mining AND “clean energy”</i>	13
ODS 8	<i>“ore mining” AND employment</i>	24
ODS 9	<i>“mining industry” AND innovation</i>	19
ODS 10	<i>mining AND equality</i>	12
ODS 11	<i>mining AND “local communities”</i>	25
ODS 12	<i>“ore mining” AND sustainability</i>	16
	<i>mining AND “circular economy”</i>	12
ODS 13	<i>“ore mining” AND “climate change”</i>	16
	<i>mining AND “carbon footprint”</i>	5
ODS 14	<i>“ore mining” AND sea</i>	26
	<i>“ore mining” AND ocean</i>	43
ODS 15	<i>“ore mining” AND biodiversity</i>	50
ODS 16	<i>mining AND peace</i>	13
	<i>“ore mining” AND justice</i>	24
ODS 17	<i>mining AND “sustainable development goals”</i>	7

Fonte: Autores

Embora a mineração de brita seja menos impactante ao meio ambiente, quando comparada à outros tipos de mineração (ouro, cobre, carvão, entre outros), uma vez que não causa contaminação do solo e de águas subterrâneas, outros impactos são comuns à atividade independentemente do tipo de mineral, como: desmatamento, mudanças na paisagem, esgotamento dos recursos naturais, poluição do ar e sonora, entre outros (SAHA; PADHY, 2011; TABATABAEI; MOHAMMADI, 2013; MONTEIRO; MOITA NETO; SILVA, 2018).

O atendimento aos ODS, além de contribuir para a mitigação dos impactos ambientais causados pela mineração, promovendo a sustentabilidade ambiental, pode garantir a inclusão social e o desenvolvimento econômico, através da geração de empregos e renda, auxiliando no combate à pobreza, principal objetivo proposto pelos ODM, lançados no ano 2000 (UN, 2015; PNUD, 2017).

4.3.1 ODS 1: Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares

Para análise do primeiro objetivo proposto na Agenda foram escolhidas as palavras-chave *mining AND poverty* em função do estabelecimento da relação entre a mineração e o

combate à pobreza. A abordagem principal nos trabalhos encontrados destaca a pobreza em áreas de mineração (BHATTACHARYYA; RESOSUDARMO, 2015; BROAD, R.; CAVANAGH, 2015), impactos de vizinhança (LU, J.; LORA-WAINWRIGHT, 2014), políticas públicas (CANAVESIO, 2014), mineração em áreas de populações indígenas (O'FAIRCHEALLAIGH, 2013), entre outras.

As áreas de mineração, normalmente, são localizadas em comunidades afastadas dos grandes centros comerciais, uma vez que a atividade depende da disponibilidade do mineral na natureza, o que leva os povoados a se formarem em torno das indústrias (CARNEY; GUSHULAK, 2016). A atividade gera empregos para os moradores do entorno das mineradoras, movimentando uma cadeia de fornecedores para o abastecimento das indústrias, gerando renda para a população, contribuindo, assim, para a diminuição da pobreza.

Além da geração de empregos diretos e indiretos, outra forma de cooperar para esse objetivo, é através do pagamento de impostos, taxas e *royalties* (TAKANO; FLORES; LIMA, 2016). Os valores arrecadados devem ser direcionados, pelo governo, em investimentos nas comunidades, melhorando a qualidade de vida da população por meio de campanhas que tem por objetivo a erradicação da pobreza, através da criação de oportunidades dentro e fora das mineradoras.

Um estudo desenvolvido no Peru demonstrou que os distritos de mineração têm maior consumo médio per capita de bens e produtos e menores taxas de pobreza do que distritos similares. Isso pode ser explicado pela presença de imigrantes com maior grau de escolaridade que são atraídos pela atividade nas minas e pelos empregos oferecidos aos nativos da comunidade, tanto nas indústrias, como em serviços relacionados à mineração (LOAYZA; RIGOLINI, 2016). Em contrapartida, uma pesquisa feita em Gana constatou que um domicílio em uma comunidade de mineração tem maior probabilidade de ser pobre em comparação a um domicílio idêntico em uma comunidade que não é mineradora (ASSAN; MUHAMMED, 2018).

Conforme percebido nas visitas feitas às mineradoras de brita da região de Monsenhor Gil, Piauí, Brasil, a atividade emprega as pessoas das comunidades locais, em todos os setores da indústria (administração, transporte, operação de máquinas, limpeza etc.). As próprias empresas fornecem o treinamento exigido pelos cargos e capacita os moradores do entorno para assumir as funções. Além disso, a atividade atrai uma série de outros pequenos negócios para atender as demandas das indústrias, como: fornecedores de peças de reposição, fardamento para colaboradores dos empreendimentos, alimentos, pneus, o que movimenta o comércio local, aumentando a oferta de empregos.

No entanto, os salários oferecidos nesses empreendimentos nem sempre suprem todas as necessidades do empregado e de sua família. Mais de 60% dos funcionários trabalham em cargos de serviços gerais, recebendo um salário mínimo, que no Brasil representa um valor em torno de R\$ 954,00 (aproximadamente, U\$ 256,00). Embora essa remuneração possibilite que a família saia da faixa da extrema pobreza, não oferece a possibilidade de ascensão social. Os cargos de operadores de máquinas, motorista e gerência possuem remuneração maior, em razão da necessidade de especialização para a função.

Nos estudos ambientais desenvolvidos pelas indústrias para a obtenção de licença ambiental e mineral, há ênfase na geração de empregos como justificativa para a implantação do empreendimento. Porém, no caso das indústrias de brita visitadas, foi constatado que a previsão descrita nos relatórios não condiz com a realidade. Dados como esse demonstram que a contradição entre a previsão e a realidade pode comprometer o alcance desse ODS, no que tange à disponibilidade de cargos nessas indústrias.

Assim, a mineração pode contribuir com recursos para a diminuição da pobreza, promovendo empregos diretos e indiretos, oferecendo salários justos, priorizando o comércio regional, incrementando a arrecadação de impostos, gerando recursos aos cofres públicos e, assim, expandindo as estratégias de combate à pobreza em todas as suas dimensões. Contudo, isto é apenas o potencial da atividade minerária e não corresponde à realidade local investigada.

4.3.2 ODS 2: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável

As palavras-chave selecionadas para pesquisar a interação entre esse objetivo e a mineração foram: “*ore mining*” AND *agriculture*, “*mining site*” AND “*soil contamination*” e “*mining site*” AND “*water contamination*”. A escolha dessas expressões possibilitou uma abrangência maior sobre a relação entre a mineração, agricultura sustentável e a contaminação do solo e de águas, a fim de fazer a conexão entre o combate à fome e o alcance da segurança alimentar.

As abordagens principais dos trabalhos encontrados nessa busca são: existência de assentamentos rurais em áreas de mineração (CONSTANTIN; STEFANESCU; KANTOR, 2015) impactos do uso de metais/minerais nos processos agrícolas (STRAWN *et al.*, 2012), contaminação do solo por metais pesados em mineradoras de calcário (LUNA *et al.*, 2016) e ouro (ABRAHAM; DOWLING; FLORENTINE, 2018), contaminação de águas superficiais

(LOPES *et al.*, 2016) e subterrâneas (HAO *et al.*, 2016), entre outros. Esses impactos podem causar danos ao solo e às águas, comprometendo a segurança alimentar na região das minas.

Para contribuir com o segundo objetivo proposto pela Agenda, no sentido de promover a agricultura sustentável, é necessário gerir de forma adequada a exploração, uma vez que há um risco real da mineração em contaminar solo e águas, como aconteceu no rompimento da barragem de rejeitos em Mariana, Minas Gerais (BRASIL; PIRES, 2017).

Nesse sentido, é necessário o monitoramento contínuo de água e solo, através de pesquisas geoquímicas, uma vez que é responsabilidade das mineradoras assegurar a utilização desses recursos, sem que haja riscos à saúde humana e animal (BRASIL, 2001). Existem técnicas, aplicáveis à diversos tipos de mineração, que possibilitam o manejo da atividade, a fim de controlar a contaminação por processos minerários, como, por exemplo, a utilização de enzimas microbianas para a avaliação e monitoramento da saúde do solo em resposta à poluição por metais pesados (WAHSHA *et al.*, 2017).

Outra técnica que promove a melhoria das condições do solo, a fim de alcançar esse ODS, é a biorremediação, que consiste na remoção dos metais tóxicos de solos contaminados através da interação de microrganismos com os metais, combinando duas atividades biológicas opostas: a das bactérias oxidantes de enxofre com a de microrganismos redutores de sulfato. Contaminantes metálicos como cobre, cádmio, níquel e outros podem ser lixiviados e os efluentes obtidos no processo podem ser limpos o suficiente a ponto de serem reutilizados no ambiente (JEREZ, 2017).

Além da contaminação do solo, os processos erosivos causam impactos no uso da terra. Um exemplo é o estudo desenvolvido no Vietnã, em mineradoras de extração de agregados para construção civil, onde o carreamento de sedimentos do solo provocou mudanças morfológicas que levaram ao desequilíbrio nas propriedades do solo e mudanças na hidrologia do rio, afetando as áreas agrícolas da região (BRUNIER *et al.*, 2014). Na Colômbia, uma pesquisa demonstrou que as águas em áreas de mineração, também de agregados, apresentam contaminação em função do acúmulo de sedimentos, com alteração de cor, sabor e odor, comprometendo seu uso na agricultura (UBAQUE; VACA; RODRÍGUES, 2014).

No Brasil, as mineradoras têm o dever de mitigar os impactos negativos que a atividade pode causar no solo e água, conforme estabelecido no processo de licenciamento ambiental. A Lei 9985, de 18 de julho de 2000, traz, em seu art. 2º, a obrigatoriedade de recuperação de áreas degradadas e a restauração de um ecossistema, ou de uma população silvestre, o mais próximo possível da sua condição original (BRASIL, 2000). Uma das formas de recuperação é a compensação ambiental, que possibilita a restauração da área após a exaustão dos recursos ou,

até mesmo, a reposição de uma área próxima, na mesma bacia hidrográfica, caso o mesmo local onde acontece a exploração não possa ser recuperado.

As indústrias de brita visitadas cumpriram as exigências legais do licenciamento ambiental e os gestores demonstram preocupação em cumprir as determinações em relação à recuperação das áreas degradadas, porém o custo com a compensação ambiental não é contabilizado no valor final do produto. Esse dado é relevante, uma vez que a recuperação ambiental é obrigatória e deve acontecer, na medida do possível, concomitante à exploração (MONTEIRO; SILVA, 2018). Situações semelhantes à essa são recorrentes em outros lugares do Brasil e do mundo (JOSA; JORBA; VALLEJO, 2012; BAUMBACH; PRADO FILHO; FONSECA, 2013). Isto significa que há um risco real de ficar um passivo ambiental que a sociedade vai ter que arcar quando a atividade minerária deixar de ser economicamente viável.

A atividade tem a oportunidade de contribuir com conhecimento de como a mineração pode afetar áreas em que a agricultura é desenvolvida com a elaboração de programas de combate à fome, que promovam a integração entre agricultura e mineração, através de parcerias desse setor com o agronegócio. Uma das formas práticas para atingir esse objetivo é o apoio econômico e tecnológico à implantação de hortas comunitárias, promovendo o envolvimento das comunidades vizinhas. Dessa forma, além do cultivo de alimentos, para suprir as necessidades alimentares, as indústrias contribuem gerando oportunidades de fontes alternativas de renda para a população.

4.3.3 ODS 3: Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades

As palavras-chave escolhidas para esse ODS foram *mining AND welfare* e *mining AND "quality of life"*, a fim de analisar como a mineração pode estar relacionada ao bem-estar da sociedade. O principal tema abordado por esses trabalhos é o impacto que a atividade tem na vida das comunidades residentes no entorno, em diferentes países, contextos e realidades. Os aspectos contemplados nos estudos são os impactos no meio ambiente (LUNA *et al.*, 2016), na saúde (CRONJÉ; REYNEKE; JÀMBÁ, 2013) e sociais (HOWARD, 2014) em áreas de mineração, bem como a comparação entre mineração em pequena e grande escala (AKUDUGU; MAHAMA; ATAMI, 2013).

A promoção do bem-estar para todos está intrinsecamente ligada à mitigação dos impactos negativos causados pela atividade. Dentre os impactos que atingem diretamente o bem-estar das comunidades vizinhas, pode-se citar: vibração do terreno (OZER *et al.*, 2008) e

alteração da topografia (ARMAGHANI *et al.*, 2015); desmatamento (UBAQUE; VACA; RODRÍGUES, 2014), alterando o microclima da região (LUNA *et al.*, 2016) e causando afugento da fauna (MILISA; ZIVKOVIC; HABDIJA, 2010); poluição do ar (PENG *et al.*, 2016); e poluição sonora (IRAMINA *et al.*, 2009).

Além de causar desconforto aos moradores da região das minas, os impactos podem atingir de forma mais direta os funcionários das indústrias. Para assegurar a integridade física dos trabalhadores é necessário o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI). A fiscalização rigorosa quanto ao uso dos EPIs, pelos gestores das mineradoras, pode garantir a proteção contra acidentes e doenças decorrentes do trabalho (LIRA *et al.*, 2012).

Nas indústrias de brita visitadas, foi possível constatar que o uso de máscaras faciais adequadas para a atividade (que cobrem todo o rosto ou apenas boca e nariz) pode garantir a prevenção de doenças pulmonares e o uso de protetores auriculares evita doenças como a surdez. É necessário que as empresas cumpram a exigência legal quanto aos exames periódicos preventivos (BRASIL, 2009), a fim de garantir a proteção dos funcionários, independentemente do tipo de minério explorado. Nas mineradoras de brita foi constatado o cumprimento dessa obrigação, uma vez que todos os funcionários fazem os exames periódicos.

Um estudo desenvolvido na Mongólia propõe que a saúde seja integrada aos projetos de Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) a fim de colaborar com esse ODS (PFEIFER *et al.*, 2017). Assim, é papel das mineradoras promover campanhas de combate a doenças, através de programas educativos à comunidade, que alcancem todas as idades. Conforme observado nas indústrias de brita, embora o foco principal dos programas educacionais seja informar a população sobre a atividade, conscientizando sobre os riscos e formas de evitá-los, é possível, também, encorajar o cuidado preventivo de doenças e promover campanhas antidrogas.

As indústrias de mineração podem contribuir apoiando campanhas de vacinação (de crianças e adultos), combate ao uso de drogas, de prevenção de enfermidades como a AIDS, entre outras, além das doenças ocupacionais relacionadas à atividade, integrando a saúde aos projetos de AIA, assegurando o acesso à informação, que pode promover o controle de doenças e melhores condições de vida da população.

4.3.4 ODS 4: Assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos

As palavras-chave utilizadas para esse ODS foram “*ore mining*” AND *education*, com o objetivo de estabelecer a conexão entre a atividade de mineração e a educação em todos os

níveis. Poucos trabalhos apresentam o link entre educação escolar e áreas de mineração, conforme constatado por Figueiredo e Piana (2016). No entanto, há trabalhos que abordam esse assunto, inclusive com o enfoque no material didático utilizado nas escolas públicas localizadas em comunidades minerárias (SULLIVAN; GREEN, 2016).

As indústrias de mineração têm o dever de promover cursos de capacitação aos seus funcionários (CARDOSO; ZIVIANI; DUARTE, 2017). Além de disponibilizar o treinamento adequado de acordo com a função, as mineradoras podem oferecer oportunidades, através da educação, para que os trabalhadores descubram e desenvolvam diferentes habilidades (TRIGINELLI; CUNHA, 2013; AZEVEDO *et al.*, 2016).

Uma forma de contribuir com esse objetivo é promovendo patrocínio através de bolsas de estudo e programas de graduação e pós-graduação, não apenas para os funcionários, mas para os membros das comunidades, também. O estabelecimento de parcerias com universidades e escolas de formação técnica e profissional garante a formação de jovens para o ingresso no mercado de trabalho. Os órgãos de fomento, como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), disponibilizam bolsas para atuação no setor industrial com uma contrapartida mínima da indústria. O CNPq investe na aplicação de recursos financeiros para a formação de pessoal qualificado para implementar projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação em empresas (CNPq, 2018).

As indústrias de brita visitadas são mecanizadas e, para operar as máquinas, é necessário fazer cursos de capacitação, que são promovidos pela própria empresa. Existem, nessas indústrias, trabalhos braçais, que não exigem nenhum nível de capacitação, que acabam sendo executados por pessoas, na maioria das vezes, com baixa escolaridade. Os funcionários que ocupam esses cargos têm apenas nível fundamental de estudo, isto é, são alfabetizados.

A comunidade vizinha às indústrias de brita visitadas possui escola de ensino fundamental e médio, porém está distante dos centros de ensino de educação superior e formação técnica, que ficam localizados em Teresina, capital do estado. Assim, nenhuma dessas indústrias possui programas para promover o acesso de jovens e adultos a cursos de nível superior e técnico, configurando a falha desses empreendimentos em contribuir com esse ODS.

Existem opções como os cursos à distância que poderiam ser implementados na comunidade, com o auxílio das mineradoras, facilitando o acesso aos cursos de educação superior e técnica para os moradores da localidade. Geralmente, os recursos computacionais e de acesso à internet dessas indústrias ficam ociosos no período noturno, podendo ser cuidadosamente disponibilizados para a comunidade.

Bud *et al.* (2018) defendem a importância dos cursos de formação que envolvem a atividade mineradora como: engenharia de minas, metalurgia, topografia, ciências ambientais geologia, entre outros. Além de oferecer oportunidades de estágios para níveis técnicos, de graduação e pós-graduação, as mineradoras podem oferecer suporte às pesquisas científicas e disseminação do conhecimento na área.

Outra forma de promover a educação, em todos os níveis, é colaborando com escolas de ensino fundamental e médio, fornecendo apoio para a manutenção das crianças na escola, material didático/pedagógico extra, além de auxiliar a comunidade na manutenção e reforma de prédios escolares. As indústrias podem criar formas de incentivo à permanência dos filhos dos funcionários na escola, promovendo premiação, bonificações e benefícios para aqueles que têm presença constante e alto rendimento escolar (boas notas).

Uma das dificuldades em relação a esse objetivo é o envolvimento da comunidade. Conforme o relato dos gestores das indústrias de brita, existem projetos de educação, promovidos por esses empreendimentos, que visam informar sobre a atividade, seus riscos e como a sociedade pode ser beneficiada pela mineração, porém não há interesse da comunidade em participar. Houve tentativas de colocar os projetos em prática, através de palestras oferecidas pelas indústrias, mas não houve adesão dos residentes do entorno. Assim, o primeiro passo no sentido de atingir esse objetivo é preparar material didático adequado à linguagem da comunidade, que desperte seu interesse. Não houve tentativa de preparar um paradidático sobre mineração que formasse e informasse sobre a atividade.

4.3.5 ODS 5: Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas

Para a pesquisa sobre esse ODS foram utilizadas as palavras-chave “*ore mining*” AND *women*. Os artigos com essa abordagem tratam da participação feminina na mineração (HELBERT, 2017), bem como problemas relacionados à saúde das mulheres residentes nessas áreas, como por exemplo, intercorrências durante a gravidez (FORT *et al.*, 2015) e doenças respiratórias devido à exposição a diferentes metais (LU, 2012).

A atividade de mineração parece ser, ainda, essencialmente masculina (MWAKUMANYA; MAGHENDA, 2016). Cabe às mulheres o trabalho em serviços de limpeza e faxina. Para colaborar com esse objetivo, é necessário promover a inclusão feminina, garantindo salários equitativos a ambos os gêneros e condições de trabalho que permitam o acesso maior de mulheres à atividade de mineração.

Os números levantados pela agência britânica PwC-UK (2018) demonstram que apenas 5% dos cargos, nas quinhentas maiores empresas de mineração do mundo, são ocupados por mulheres. A pesquisa apontou ainda a porcentagem de mulheres na mineração em alguns países: África do Sul (21,5%); Austrália (11,97%); EUA (7,34%); Hong Kong (6,02%); Canadá (5,24%); e Reino Unido (4,27%) (PwC-UK, 2018). No Brasil, a participação feminina na mineração chega à 12% dos cargos (BRASIL MINERAL, 2017).

Botha (2016) atestou, em um estudo desenvolvido na África do Sul, que os maiores desafios enfrentados pelas mulheres, no setor de mineração, são os abusos e assédios sexuais. Os incidentes mais comuns são: assobios, uso de linguagem vulgar ou depreciativa, exibição de partes do corpo, contato físico, podendo chegar até mesmo ao estupro e troca de favores sexuais para promoção. Além disso, existem discrepâncias entre os salários pagos aos homens e mulheres. Mesmo ocupando a mesma posição, as mulheres recebem salários menores do que os homens.

Nas indústrias de brita visitadas foi possível perceber a presença de mulheres em cargos administrativos, de limpeza e cozinha, o que representa, aproximadamente 3% a 5% do quadro de funcionários, evidenciando uma realidade diferente da média brasileira (12%). Não há, nessas mineradoras, mulheres operando máquinas e equipamentos, assim como em cargos de gerência. A alegação mais comum dos gestores das indústrias é que as mulheres podem engravidar, o que gera a despesa com a licença maternidade e a necessidade de substituição por outro funcionário durante esse período, por isso a preferência para contratar homens.

Além disso, foi mencionado que alguns cargos exigem “força física”, como o caso da colocação do produto nos caminhões com o auxílio de pás, o que, no entendimento dos gestores, é necessária a estrutura do corpo masculino, uma vez que as mulheres costumam ser mais frágeis e não conseguem desempenhar, com a mesma facilidade, esse tipo de atividade. No entanto, há possibilidade de participação feminina em cargos de gerência e, até mesmo, operando máquinas que não exigem força física, descaracterizando a lógica de que as mulheres devem ocupar apenas funções de faxineira/cozinheira/secretária.

A inclusão feminina, nas atividades de mineração, ainda parece distante da realidade. É necessária a abertura desse mercado para as mulheres, com oportunidades justas e iguais, para que possa haver mudança nessa situação. Helbert (2017) propõe a adoção de uma ética eco feminista para ajudar a identificar alternativas para corrigir a distribuição desigual dos riscos e benefícios dos projetos de mineração entre homens e mulheres. Assim, combater a discriminação e assédios, incentivar a participação de mulheres em posições de liderança, disponibilizar EPIs adequados às necessidades femininas, pagamento de salários equitativos

são algumas das medidas que devem ser adotadas pelas mineradoras, a fim de garantir a inclusão feminina na mineração.

4.3.6 ODS 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos

As palavras-chave utilizadas para estabelecer a relação entre mineração e saneamento foram *mining AND sanitation*. A principal abordagem dos artigos recuperados está relacionada à toxicidade das águas e as diversas formas de contaminação por metais durante os processos minerários (HAO *et al.*, 2016) e após o fechamento da mina (LOPES *et al.*, 2016). Evitar a contaminação de águas superficiais e subterrâneas é um desafio inerente à atividade de mineração. O monitoramento constante das águas do entorno é fundamental para garantir a qualidade dos recursos hídricos (ARHIN; BOANSI; ZANGO, 2016).

As indústrias devem apoiar as obras de saneamento, fornecendo relatórios periódicos sobre as condições das águas servidas, além de assumir a responsabilidade sobre a gestão da bacia hidrográfica à qual a indústria pertence (BRASIL, 2001). O incentivo à utilização de fontes alternativas, como águas de reuso e recicladas e a redução do consumo, são atitudes que podem contribuir para o alcance desse objetivo.

Para a gestão eficiente dos recursos hídricos é necessário envolvimento do governo, através de projetos, políticas e ações que visem manter o equilíbrio hídrico das áreas de mineração. Alinhar interesses políticos, econômicos e sociais relacionados à água é uma das formas de promover a gestão sustentável e saneamento para todos. A participação das comunidades locais nas discussões para melhorar as políticas, tecnologias e meios de gestão relacionados ao tratamento de água é essencial para atingir esse objetivo (SENA *et al.*, 2016)

Alguns lugares do planeta são mais vulneráveis do que outros, em relação à disponibilidade de água. Segundo Sena *et al.* (2016), o acesso à água com segurança e qualidade ainda é um desafio para a região do semiárido brasileiro. Os padrões locais de chuvas, tipos de solo e condições sociais devem ser levados em consideração na preparação de tecnologias para suprimento e armazenamento de água para a população, uma vez que a seca na região é recorrente e prolongada, assim como em outros lugares do mundo, o que requer maior atenção em regiões de mineração.

Nas indústrias de brita visitadas, a água é captada de poço artesiano, instalado dentro da indústria. Um dos pressupostos do licenciamento ambiental é a exigência de outorga do poço artesiano para a obtenção de licença de operação. Conforme constatado, uma das indústrias não

possui outorga, configurando a falha, tanto da indústria em cumprir essa exigência, como do órgão ambiental, que concedeu a licença mesmo sem a apresentação desse documento.

A utilização da água na atividade de mineração de brita é para o abastecimento das instalações (cozinha, banheiros, oficina) e para os aspersores de água, instalados nas correias transportadoras, para a minimização da poeira de brita, material particulado oriundo do processo de britagem. Essas indústrias consomem em média 20.000 L/dia de água. Na mineração de carvão e minério de ferro, por exemplo, há necessidade de uso de água durante o processo exigindo maior atenção e cuidado quanto ao consumo, devendo ser utilizada, preferencialmente, água de reuso (LIPHADZI, S. M.; VERMAAK, 2017).

As indústrias de mineração de brita, geralmente, não contaminam os recursos hídricos, como acontece em outros tipos de mineração (ouro, diamante etc.). No entanto, a responsabilidade de monitoramento da qualidade das águas e apoio ao saneamento compete, também, a esse tipo de indústria uma vez que as indústrias de brita fornecem os insumos (agregados) necessário para as obras de saneamento e infraestrutura, contribuindo para o alcance desse objetivo.

4.3.7 ODS 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos

Para a busca de trabalhos que relacionem a mineração e a energia foram utilizadas as palavras-chave *mining AND “clean energy”*. Os artigos recuperados nessa pesquisa abordam as diversas formas de utilização da energia na atividade (PALAMURE, 2016), inclusive o uso de energia limpa (CHOI; CAO; ZHAO, 2016). Para colaborar com esse objetivo, as mineradoras devem aprimorar a eficiência energética, reduzindo o consumo, na medida do possível e melhorando a manutenção da infraestrutura energética do local onde estão inseridas. A escolha de fontes de energia renováveis como sistemas de energia solar, eólica e geotérmica são opções que podem reduzir as interrupções no local das minas e melhorar a distribuição de energia para as comunidades do entorno (WORLD ECONOMIC FORUM, 2016).

Em relação às emissões atmosféricas provenientes do uso de energia, o Brasil é um país que apresenta um baixo índice de emissão de CO₂, quando comparado a outros países. O índice brasileiro, no ano de 2016, foi de 101,3 kg CO₂/MWh, enquanto a China apresentou um índice de emissões de CO₂ de 772,1 kg/MWh, os EUA, 489,8 kg/MWh e a União Europeia, 366,2 kg/MWh. Além disso, a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira foi de 43,5%, sendo um dos índices mais altos do mundo (BRASIL, 2017a).

Há, no estado do Piauí, 82 empreendimentos eólicos contratados em leilões de energia, com capacidade instalada de 1.439 MW e 9 empreendimentos fotovoltaicos, com capacidade instalada de 270 MW. A incidência dos ventos e o potencial de irradiação solar colocam o Nordeste brasileiro em posição de destaque para a utilização desses tipos de fonte energética (BRASIL, 2017b).

Dentre as indústrias de brita, duas operam com energia elétrica e uma com geradores à diesel. O consumo médio mensal de energia elétrica para o funcionamento das indústrias é de 36.000 kWh e o consumo de óleo diesel para a empresa que opera com gerador é de 15.000 L, para uma produção de 20.000 m³ de brita. Foi possível observar que acontecem várias interrupções no fornecimento de energia elétrica, o que compromete o bom funcionamento da indústria e causa avarias nos equipamentos. A demanda de energia para o funcionamento dos equipamentos é alta e exige alternativas que sejam eficientes e que causem menos impactos ambientais.

Uma característica observada nessas indústrias, que se aplica a outros tipos de mineração, é o consumo diferenciado de energia nas diferentes etapas do processo (PALAMURE, 2016). Cada etapa exige uma demanda energética que deve ser avaliada no momento de optar pelo tipo de fonte de energia para operar a indústria, no caso de haver possibilidade de escolha. Além do equipamento de britagem, a energia é necessária para o funcionamento das instalações internas (escritório, refeitório, oficina). Os demais equipamentos, como as máquinas (escavadeiras, pás carregadeiras etc.), são operados com a utilização de combustíveis como óleo diesel.

Palamure (2016) observou que as operações de mineração em grande escala são mais eficientes, em relação ao consumo energético, em comparação com as escalas médias e pequenas, exigindo menor quantidade de energia para processar uma unidade de minério. Isso sugere que há economia de escala, baseada na eficiência energética, nas operações de mineração de minério de ferro, podendo ser aplicável a outros tipos de mineração.

As mineradoras podem adotar iniciativas para a geração de energia limpa nos locais onde estão inseridas. Levesque, Millar e Paraszczak (2014) discutem uma nova abordagem de *benchmarking*⁵, específica para minas, para demonstrar a melhoria contínua na eficiência energética na indústria de mineração.

Para haver inovações na gestão de energia, a comunicação de questões energéticas deve ser transparente a fim de que haja parâmetro de comparação entre as diferentes operações para

⁵ Avaliação comparativa

que se possa escolher a opção mais viável para cada caso específico e, dessa forma, compartilhar os benefícios dessa escolha com a sociedade. Atualmente, há norma específica da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a gestão de energia, baseada na ISO 50001:2011 (ISO 50001, 2011).

4.3.8 ODS 8: Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos

As palavras-chave utilizadas para esse ODS foram “*ore mining*” *AND employment*, a fim de verificar como tem sido a abordagem da geração de empregos na atividade minerária. Os artigos recuperados tratam de assuntos como carreira na mineração (TORPEY, 2013), participação feminina na atividade (KOTSADAM, A.; TOLONEN, 2016) e trabalho infantil (MACONACHIE, R.; HILSON, 2016).

A atividade de mineração gera uma cadeia de empregos e renda à população do entorno das indústrias. Para o funcionamento da atividade, há necessidade de suprimentos, tais como: materiais de escritório, materiais de limpeza, alimentos, confecção de fardamentos, EPIs, combustíveis, peças de reposição e manutenção para os equipamentos, máquinas e frota, entre outros (HUANG; FAYSSE; REN, 2017).

As indústrias devem, na medida do possível, dar preferência para adquirir esses itens no mercado local, movimentando o comércio das comunidades do entorno, trazendo renda para a região. Além disso, devem promover o acesso a emprego pleno e produtivo, fornecendo capacitação aos funcionários, garantindo a inclusão de forma equitativa, colaborando, também, com a erradicação do trabalho infantil.

Conforme constatado nas visitas às mineradoras de brita, uma das justificativas para a instalação dos empreendimentos é a geração de empregos para os moradores da região. Nos processos de licenciamento ambiental dessas indústrias, esse argumento permeia as discussões sobre a viabilidade do projeto. No entanto, há divergência entre a quantidade de funcionários prevista nos estudos ambientais e a realidade. Em uma das indústrias, a quantidade informada é menor do que a real, enquanto, em outra, esse número é maior. Essa inconsistência nos relatórios é relevante por ser a geração de empregos um fator viabilizador da implantação de um projeto minerário (MONTEIRO; SILVA, 2018).

De fato, há uma cadeia de empregos gerados por essas indústrias. Com a chegada das mesmas, na região, houve aumento na oferta de trabalho, tanto nas próprias empresas, como em outros estabelecimentos comerciais que foram instalados na cidade, para atender a nova

demanda. Além das lojas de suprimentos, uma indústria de fabricação de postes de iluminação pública foi instalada, em função do acesso mais fácil à brita, insumo utilizado para a fabricação de postes. Essa realidade pode ser aplicada a outros tipos de mineração, em outros lugares do mundo (TORPEY, 2013; HUANG; FAYSSE; REN, 2017)

O pagamento de salários justos e boas condições de trabalho, também, são fatores decisivos para atingir esse ODS. Nas mineradoras de brita visitadas foi constatado que são oferecidas boas condições de trabalho, incluindo o fornecimento dos EPIs para proteger contra acidentes e evitar doenças causadas pela atividade. Uma das indústrias possui uma ampla área de lazer para o uso dos funcionários e suas famílias, com churrasqueira e piscina natural. No entanto, os salários pagos são baixos, embora de acordo com o estabelecido pelo Sindicato que rege a atividade (SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL – SINDUSCON).

Existem situações que devem ser combatidas em um esforço conjunto entre indústria, governo e sociedade, como a exploração do trabalho infantil na mineração (MACONACHIE, R.; HILSON, 2016) e condições indignas para as mulheres (BOTHAS; 2016). Assim, as mineradoras desempenham um papel importante na promoção de empregos para os moradores da região das minas, desde que promovam condições dignas de trabalho, salários justos, combatendo a discriminação pelo gênero e o trabalho infantil.

4.3.9 ODS 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação

Para verificar como a indústria da mineração pode estar inserida em um contexto de inovação foram utilizadas as palavras-chave “*mining industry*” *AND innovation*. Os trabalhos recuperados abordam diferentes tecnologias utilizadas na mineração (SHI, 2015), relacionamento com cliente (BIGGEMANN *et al.*, 2013) e fornecedores (BRAVO-ORTEGA; MUÑOZ, 2018), além da relação entre inovação e sustentabilidade no setor mineral (ROSA *et al.*, 2014).

As indústrias de mineração demandam das pesquisas científicas uma vez que a atividade exige técnicas especializadas em várias áreas como a geologia, engenharia de minas, entre outras. A inovação nos equipamentos, formas de manejo e técnicas, além da melhoria na gestão dos processos produtivos dessas indústrias, representam uma oportunidade para as mineradoras contribuírem com esse objetivo. Singh (2017) afirma que o desenvolvimento de pesquisa e inovação na mineração pode assegurar que os recursos minerais sejam convertidos em reservas

economicamente mineráveis, com segurança e com impacto mínimo sobre o meio ambiente, além de aumentar a produtividade.

Em relação à infraestrutura, as mineradoras podem contribuir compartilhando e expandindo o acesso aos serviços essenciais como: obras de saneamento básico, construção de estradas, ferrovias, portos, pontes, moradias, entre outros (MONTEIRO; MOITA NETO; SILVA, 2018). Além disso, devem incentivar a aquisição de bens e serviços locais, garantindo a industrialização inclusiva e integração com o comércio local. Conforme constatado nas visitas às mineradoras de brita, as estradas de acesso à comunidade foram pavimentadas pelas indústrias, melhorando a infraestrutura da região.

A colaboração entre governo, sociedade, indústrias, academia e *stakeholders*, a fim de apoiar políticas que visem a propagação de inovações na mineração é um dos caminhos para o alcance desse objetivo (WORLD ECONOMIC FORUM, 2016). É preciso o aprimoramento nas pesquisas científicas de forma que novidades tecnológicas possam ser implementadas visando a construção de infraestruturas mais resilientes e o aperfeiçoamento no processo de industrialização. A inovação pode melhorar a competitividade no setor, uma vez que promove a criação de novos produtos e de processos visando a minimização de impactos no ambiente (ROSA *et al.*, 2014).

Outra maneira de incentivar a inovação é por meio a utilização de tecnologias da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (sensores, código de barras, *smartphones*), os Sistemas *Cyber*-físicos (controladores e sistemas de sensores), a Fabricação na Nuvem (internet, comércio virtual) e a Fabricação Aditiva (impressoras 3D). Os avanços nas tecnologias de manufatura digital contribuem para a tomada de decisão, tendo como base a gestão sustentável das operações nas indústrias (JABBOUR *et al.* 2018) Um exemplo da aplicação dessa tecnologia na mineração é o uso de robôs em cavernas e áreas de risco, bem como nos ensaios laboratoriais, manuseio de explosivos e montagem e manutenção de equipamentos (COTA *et al.*, 2017).

Um dos entraves em relação à infraestrutura, no setor de mineração, é a logística de transporte. Nas indústrias de brita visitadas, foi percebido que as mineradoras devem ser localizadas próximas aos centros consumidores, pois, por ser um produto de baixo valor agregado, a localização distante inviabiliza o comércio desse mineral. Essa situação é observada para outros tipos de mineração, também (HEIDER, 2013).

Portanto, o investimento em infraestrutura para melhorar o transporte dos produtos, como a construção de estradas, ferrovias, portos, é um benefício que se estende à comunidade. Nesse sentido, a colaboração do governo é fundamental para que as indústrias tenham

incentivos para implementar as melhorias necessárias que poderão ser usufruídas pela sociedade em geral.

4.3.10 ODS 10: Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles

As palavras-chave utilizadas na pesquisa sobre como a mineração pode contribuir com a redução das desigualdades foram *mining AND equality*. A principal abordagem dos trabalhos recuperados trata do impacto da mineração na pobreza (LOAYZA; RIGOLINI, 2016), igualdade de gênero (JOHANSSON; RINGBLOM, 2017), além de justiça ambiental (VELICU; KAIKA, 2017).

As indústrias de mineração podem contribuir com esse objetivo empregando as pessoas das comunidades do entorno, com pagamento de salários justos, reduzindo as disparidades salariais locais. A criação de políticas que visem a redução da desigualdade, é papel de qualquer indústria, inclusive da mineração, promover a inclusão social através do emprego direto, colaborando com o governo a fim de expandir o acesso aos serviços básicos de infraestrutura para todos.

Para colaborar de forma efetiva com a redução das desigualdades, as mineradoras devem antecipar os riscos, identificando a dinâmica da população local, antes e depois da instalação da indústria (WORLD ECONOMIC FORUM, 2016). Promover o recrutamento e treinamento da população marginalizada, trabalhar em parceria com empresários locais e incentivar a alocação dos recursos advindos da mineração para os investimentos sociais para as populações são algumas das atitudes possíveis para atingir esse objetivo.

Algumas mineradoras são localizadas em áreas indígenas. As indústrias devem incluir as comunidades tradicionais em suas atividades, pois esses povos podem contribuir com conhecimentos e hábitos, que devem ser valorizados e respeitados (ROCHA; BOSCOLO; FERNANDES, 2015). Um estudo desenvolvido na Austrália demonstrou que a pressão pública e os benefícios do povo aborígine local impulsionaram a instalação de programas de educação vocacional indígena, aumentando a capacitação e a oferta de emprego para esses povos na indústria de mineração (PEARSON; DAFF, 2013).

Para diminuir as desigualdades entre os países, as mineradoras podem elaborar planos de cooperação, principalmente, entre países vizinhos. Indústrias localizadas em áreas de fronteiras devem promover a igualdade e compartilhar infraestrutura na localidade em que se inserem. No caso, por exemplo, dos países do Mercado Comum do Sul (MERCOSUL), Oliveira

e Espíndola (2015), sugerem que é preciso haver uma maior harmonização no que diz respeito às legislações ambientais, por serem países fronteiriços, que possuem biomas em comum.

Uma das maneiras de avaliar a viabilidade da implementação de um empreendimento minerário é através da consideração de cenários com ou sem a presença da indústria. Nos processos de licenciamento ambiental do Brasil, essa análise faz parte da ponderação sobre a concessão ou não de licença ambiental (BRASIL, 2001). Assim, a projeção de diferentes cenários pode auxiliar na indicação de estratégias para a redução das desigualdades, dentro e entre países, atingindo, assim, esse ODS.

4.3.11 ODS 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis

Para estabelecer a conexão entre o ODS 11 e a mineração foram utilizadas as palavras-chave *mining AND “local communities”*. Os principais assuntos abordados por esses trabalhos estão relacionados a leis ambientais, crescimento, desenvolvimento e sustentabilidade social/ambiental das comunidades locais (KAI *et al.*, 2015; LIMA *et al.*, 2016; KATZ; PIETROBELLI, 2018).

Os impactos decorrentes do crescimento das cidades e comunidades têm causado diversas consequências ambientais e sociais como: aumento da violência, da pobreza e das desigualdades; diminuição das áreas verdes e da fauna, poluição de rios, entre outras (PASTERNAK, 2016), que se aplicam às áreas de mineração. O desafio da urbanização consiste no desenvolvimento das cidades de forma ambiental e socialmente sustentável.

As mineradoras podem contribuir promovendo o desenvolvimento de estratégias para a criação de áreas urbanas resilientes, envolvendo indústrias, governo e comunidade no planejamento e no uso da terra, na implementação de planos de conservação de patrimônios culturais e na recuperação de espaços verdes. Promover a reciclagem e reaproveitamento de resíduos de mineração, também, é uma forma de contribuir com a diminuição dos impactos ambientais, geração de oportunidades de inclusão social e melhora nas condições do ambiente urbano.

Para equilibrar as diferentes dimensões da sustentabilidade na mineração é preciso considerar a atividade sob quatro prismas: o arcabouço e a funcionalidade da regulação ambiental para proteger o meio ambiente (sustentabilidade ambiental); competitividade da indústria de mineração à luz da regulamentação ambiental e sua aplicação (sustentabilidade econômica); a participação pública e as oportunidades que as comunidades locais têm para

influenciar o seu entorno, bem como a aceitação de projetos pelas comunidades antes e durante as operações (sustentabilidade social); e a proteção dos direitos culturais em projetos de mineração (sustentabilidade cultural) (KAY *et al.*, 2015).

Outra forma de atingir esse objetivo é a recuperação de áreas degradadas pela atividade. A lei brasileira exige que as mineradoras recuperem o ambiente degradado, durante e após a exploração (BRASIL, 1997). O atendimento a esse princípio legal pode tornar o ambiente no entorno das indústrias mais saudável. Nas visitas às mineradoras de brita, foi possível perceber que essas indústrias não fazem a recuperação das áreas degradadas pela atividade. A alegação comum é de que não é possível recuperar uma área que está em plena operação, o que torna o processo inviável.

Quando não existe a possibilidade de reabilitar a área que ainda está sendo explorada, as mineradoras têm a opção de promover a recuperação de um local próximo, na mesma bacia hidrográfica, garantindo que seja feita a compensação pela exploração mineral (MONTEIRO; SILVA, 2018). Assim, as indústrias têm o papel de promover ambientes saudáveis, dentro e fora do local em que estão instaladas, a fim de contribuir para o alcance desse objetivo.

A instalação de atividade minerária afeta o entorno e cidades próximas. Após o esgotamento da mina pode acontecer uma crise econômica da região. Portanto faz parte da responsabilidade socioambiental das mineradoras ampliar as possibilidades de assistência à população após o término de suas atividades.

4.3.12 ODS 12. Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis

Para conhecer os trabalhos que relacionam a mineração com produção e consumo sustentáveis foram utilizadas as seguintes combinações de palavras-chave: “*ore mining*” AND *sustainability* e *mining* AND “*circular economy*”. A principal abordagem dos artigos recuperados é sobre a possibilidade de recuperação, reciclagem e reuso de resíduos na cadeia produtiva dos diferentes tipos de mineração, de forma a tornar a atividade mais sustentável (SCHOENBERGER, 2016; LEBRE; CORDER; GOLEV, 2017; SCHNEIDER *et al.*, 2017).

Para alcançar padrões sustentáveis de produção e consumo, as indústrias de mineração devem aprimorar a gestão dos resíduos através de técnicas de reciclagem, reaproveitamento e reuso. No Brasil, a Lei 12.305, de 12 de agosto de 2010, determina o destino dos materiais que não podem ser reaproveitados de nenhuma maneira. Os mesmos devem ser coletados pela prefeitura ou depositados nos locais adequados pelo próprio gerador, como o caso dos resíduos

industriais (BRASIL, 2010). Os demais resíduos gerados por essas indústrias podem ser, de alguma forma, reaproveitados, com base, por exemplo, nos princípios da economia circular.

A incorporação do conceito de economia circular, baseado no princípio da reutilização dos resíduos, dentro de uma cadeia produtiva, reduzindo o desperdício, gerando ganhos econômicos, sociais e ambientais, pode auxiliar na mudança de padrões de produção e consumo, a fim de tornar as atividades do setor de mineração ambientalmente sustentáveis, socialmente justas e economicamente viáveis.

A economia circular apresenta novas oportunidades, estimulando práticas de gestão e criando valor às organizações em harmonia com o meio ambiente (LEITÃO, 2015). Assim, a prática de uma economia mais próxima da circular pode contribuir para o desenvolvimento sustentável, uma vez que há diminuição do desperdício, aumento de rendimento, através da melhoria na gestão dos processos produtivos, refletindo na melhora da qualidade de vida da população.

Em relação à atividade de mineração, o gerenciamento proativo e preventivo dos resíduos fornece benefícios ambientais, gerando valor com o material que seria desperdiçado das minas (LEBRE; CORDER; GOLEV, 2017). Portanto os princípios da economia circular, referentes à otimização e aprimoramento do uso do capital natural, podem ser aplicados de forma prática a uma operação de mineração, contribuindo para atingir esse objetivo.

As mineradoras estudadas, assim como qualquer outro tipo de indústria de mineração, podem, através de campanhas, em colaboração com o governo, promover para a comunidade o ensino de ações práticas de reciclagem de resíduos domésticos, para reaproveitamento próprio e, até mesmo, para comercialização. Dessa forma, podem contribuir com a conscientização sobre a importância da adoção de atitudes para evitar desperdício, promovendo o reaproveitamento de materiais, tornando o padrão de produção e consumo, mais sustentável do ponto de vista econômico e ambiental.

4.3.13 ODS 13. Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos

As palavras-chave escolhidas para esse objetivo foram “*ore mining*” AND “*climate change*” e *mining* AND “*carbon footprint*”, a fim de entender como a mineração pode contribuir com o combate aos impactos provenientes das mudanças climáticas. Os trabalhos abordam como a atividade das minas afeta as mudanças climáticas em função do desmatamento e das emissões atmosféricas (UBAQUE; VACA; RODRÍGUES, 2014; ALEKE; NHAMO, 2016).

Para auxiliar no combate às mudanças climáticas, as empresas de mineração devem reduzir potencialmente a sua pegada de carbono. Estudos têm sido conduzidos, utilizando a ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para identificar formas de aprimorar os processos produtivos da mineração (MORENO-LEIVA *et al.*, 2017).

Silva *et al.* (2016) afirmam que os grupos populacionais em situação de vulnerabilidade social e econômica sofrem mais com as mudanças climáticas, como é o caso de populações que vivem em regiões de mineração. É importante conhecer as diversas realidades e necessidades a fim de conectá-las a um leque mais amplo de soluções para uma sobrevivência solidária e pacífica. Nesse sentido, a educação e conscientização da população é uma ferramenta importante para alcançar esse ODS, principalmente, em função da adaptação e construção de resiliência em relação às grandes mudanças.

Conforme observado nas visitas às mineradoras de brita, é necessário desmatar a área onde é feita a exploração, suprimindo completamente a vegetação do local para a instalação do britador e das dependências da indústria e para a extração do minério. Além do efeito na mudança do clima da região, o impacto do desmatamento causa alterações na paisagem e afugento da fauna, principalmente, pássaros. No entanto, a consequência mais evidente é a modificação no microclima, que é sentida pelos moradores do entorno. Essa realidade aplica-se, também, a outros tipos de mineração, como minério de ferro (RANJAN, 2018).

As mineradoras podem contribuir planejando investimentos, projetando riscos e criando oportunidades para a redução dos impactos das mudanças climáticas, principalmente, monitorando a área das minas sobre alterações no microclima da região e divulgando, com transparência, relatórios que auxiliem a tomada de decisão quanto às medidas mitigadoras, a fim de controlar esse impacto. Além disso, é necessário o envolvimento das empresas, governo e *stakeholders* para alinhar estratégias corporativas a fim de combater as mudanças no clima, de forma global.

4.3.14 ODS 14. Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável

Para a pesquisa sobre como a mineração pode impactar os recursos marinhos foram utilizadas as palavras-chave “*ore mining*” AND *sea* e “*ore mining*” AND *ocean*. Os trabalhos recuperados demonstram que a mineração causa diversos impactos nos oceanos, mares e rios, tais como: mineração em alto mar (SANTOS *et al.*, 2018), deposição de resíduos e rejeitos (MA; SCHOTT; LODWIJKS, 2017), impacto sobre as populações ribeirinhas (BRASIL;

PIRES, 2017), entre outros. As mineradoras devem contribuir para a sustentabilidade dos oceanos e rios por meio da mitigação dos impactos causados pela atividade, nesse contexto.

Para atender esse objetivo é preciso compreender a dependência das comunidades locais em relação ao uso dos recursos marinhos e ribeirinhos, auxiliando na gestão da atividade pesqueira (SILVA; AZEVEDO; FERREIRA, 2013). A proteção dos ecossistemas aquáticos garante a manutenção do sustento dos povoados residentes nesses locais.

Em função da escassez de recursos, em algumas regiões do mundo, têm crescido os investimentos em mineração em mar profundo. Novas tecnologias têm sido desenvolvidas a fim de aprimorar as técnicas de extração em alto mar. Esse tipo de exploração acarreta impactos, como o transporte de sedimentos tóxicos que podem afetar o equilíbrio dos ecossistemas marinhos. Além disso, é um tipo de mineração que necessita de altos investimentos em equipamentos e tecnologia (SANTOS *et al.*, 2018).

Para contribuir com esse ODS, as mineradoras precisam avaliar, criteriosamente, os impactos da exploração em alto mar, colaborar com o governo no sentido de criar áreas de proteção, conservação e reservas marinhas, contribuir para a pesquisa científica e inovação, desenvolver planos de gestão de zonas costeiras com governo e comunidades locais, colaborar com o desenvolvimento da atividade pesqueira de forma sustentável, respeitando o período de defeso⁶ e dispor adequadamente resíduos e rejeitos.

4.3.15 ODS 15. Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade

As palavras-chave utilizadas para esse ODS foram “*ore mining*” AND *biodiversity*. Os trabalhos recuperados nessa pesquisa abordam as diversas formas de impacto da mineração na biodiversidade (TABATABAEI; MOHAMMADI, 2013; VILLARROYA; BARROS; KIESECKER, 2014; RITTER *et al.*, 2017; MONTEIRO; MOITA NETO; SILVA, 2018).

As indústrias de mineração podem atingir esse objetivo reduzindo os impactos gerados pela atividade e adotando medidas de compensação ambiental. Ainda que não seja possível recuperar uma área que está em plena atividade, existem formas de compensar a exploração, recuperando outras áreas, próximas ou distantes das minas (BRASIL, 2001).

⁶ Período de pesca proibida em função da reprodução dos peixes.

No Brasil, as mineradoras devem pagar uma tarifa mensal, a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), como parte do custo ambiental da exploração de recursos naturais não renováveis, a qual é calculada sobre o valor do faturamento líquido e é diferente para cada tipo de mineração. Os recursos recolhidos com a CFEM são aplicados em projetos que, direta ou indiretamente, beneficiem a comunidade local (DNPM, 2004). Muitos países admitem o uso de compensações, no entanto, nem todos exigem sua implementação, como acontece no Brasil (VILLARROYA; BARROS; KIESECKER, 2014).

A indústrias de mineração devem adotar medidas compensatórias a fim de recuperar o ambiente degradado e mitigar a perda de biodiversidade. O monitoramento da atividade é uma forma de garantir a conservação do ambiente explorado, para futura recomposição e conservação dos serviços ecossistêmicos. Esse monitoramento deve ser feito pelas indústrias, pela comunidade e pelos órgãos fiscalizadores do governo (BRASIL, 2001; JASKOSKI, 2014).

A comunidade tem participação nesse processo, acompanhando e denunciando a atividade que está fora dos padrões estabelecido por lei. Para isso, é necessário informar e educar a população sobre a mineração, para que, assim, possa auxiliar o poder público no monitoramento da atividade. Um estudo desenvolvido no Peru demonstrou que a participação popular, em zonas de extração, tem sido fundamental na aprovação ou rejeição dos projetos de mineração. O envolvimento da comunidade, através das audiências públicas, tem um impacto significativo nas decisões do governo resultando na suspensão ou cancelamento de projetos, em alguns casos (JASKOSKI, 2014).

Nas visitas feitas às mineradoras de brita ficou evidente que o órgão ambiental não cumpre o papel fiscalizador, uma vez que não faz fiscalizações periódicas nessas indústrias. Apenas uma delas recebeu uma fiscalização em decorrência da denúncia feita pela comunidade sobre o acúmulo de resíduos sólidos na estrada que dá acesso à indústria, confirmando, assim, a importância da participação da sociedade no processo de monitoramento das atividades de mineração.

Outra particularidade das indústrias de brita é a dispersão de material particulado, que se acumula nas vegetações do entorno. Esse acúmulo de pó de brita pode causar mudanças na morfologia vegetal, alterando a paisagem natural (TABATABAEI; MOHAMMADI, 2013). Esse impacto pode ser minimizado com o uso de aspersores de águas nas correias transportadoras, que diminuem a incidência do material particulado, conservando a vegetação original (MONTEIRO; MOITA NETO; SILVA, 2018).

Além da compensação ambiental e do monitoramento das atividades, as mineradoras podem contribuir com esse ODS articulando ações com o governo para criar campanhas de

combate à desertificação, instruindo as comunidades locais sobre a conservação do ambiente e da biodiversidade, evitando o desmatamento desnecessário e protegendo as áreas onde estão instaladas.

4.3.16 ODS 16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis

Para relacionar a mineração com a busca pela paz e justiça foram utilizadas as palavras-chave *mining AND peace* e “*ore mining*” *AND justice*. Os trabalhos recuperados abordam conflitos em regiões minerárias (ORTIZ-RIOMALO; RETTBERG, 2018), criminalidade e violência (ALLEN, 2017), subornos e corrupção (KNUTSEN *et al.*, 2017), e as medidas para resolver esses e outros problemas a fim de promover a paz dentro e através da atividade de mineração.

A promoção da paz e justiça, em todos os seus níveis, é necessária a todo tipo de atividade econômica/industrial. A mineração pode alcançar esse objetivo de diversas formas: combatendo a corrupção e suborno em todos os níveis, divulgando informações de forma transparente, amenizando conflitos com a comunidade local, garantindo a tomada de decisão de forma inclusiva e participativa entre governo/empresa/comunidade e garantindo o Estado de Direito⁷.

O combate à corrupção deve ser uma busca constante em regiões de mineração. Um estudo desenvolvido na África constatou que as áreas de mineração se tornam mais corruptas depois que as minas são abertas, mesmo não apresentando esse cenário antes do início da exploração. A pesquisa salienta, ainda, que a atividade econômica local se relaciona de maneira diferente com a corrupção nas áreas onde não há atividade minerária, sugerindo que a renda da mineração incentiva e permite que as autoridades locais aceitem subornos (KNUTSEN *et al.*, 2017). Esse cenário acontece, também, no Brasil (BRASIL; PIRES, 2017), na Austrália (MCCLINTOCK; BELL, 2013), assim como em outras partes do mundo.

No intuito de promover a paz e garantir a justiça para todos, evitando a corrupção em todos os seus níveis, as mineradoras devem ter uma compreensão profunda da história, leis, cultura e religiões da região onde estão instaladas; conduzir suas operações de acordo com as

⁷ O Estado de direito existe para garantir o respeito à liberdade civil, aos direitos humanos e às garantias fundamentais, através do estabelecimento de uma proteção jurídica, cujas regras são impostas, inclusive, às autoridades políticas que a elas devem se sujeitar (SANTOS, 2011).

leis locais e internacionais, e com os mais altos padrões de prática ética; e desenvolver e manter procedimentos e protocolos adequados relacionados à atividade (MCCLINTOCK; BELL, 2013). No Brasil, aprimorou-se a legislação para prevenir, através da *compliance*, novos casos de corrupção envolvendo empresas (BRASIL, 2013).

Uma das ferramentas úteis para alcançar esse objetivo é o estabelecimento de ouvidorias, espaço que possibilita a interação entre a população e as instituições (indústrias, governo etc.) a fim de garantir o acesso inclusivo e a participação da tomada de decisões. Além disso, a promoção de audiências públicas, também, facilita a conquista desse ODS. Dessa forma, com a colaboração de todas as partes interessadas, é possível a busca por uma sociedade mais pacífica e justa.

Nas visitas às mineradoras de brita, apurou-se que não houve pedido de audiências públicas para nenhum dos empreendimentos, configurando a falta de envolvimento da sociedade nos processos de licenciamento ambiental. A legislação brasileira estabelece que empreendimentos extrativistas, publiquem o pedido de licenciamento em mídias locais, como os jornais (BRASIL, 1997), para que possam ser requeridas as audiências públicas. O órgão ambiental promove a realização das mesmas quando julga necessário, ou quando solicitado por entidade civil, pelo Ministério Público, ou por cinquenta ou mais cidadãos (BRASIL, 1987). O envolvimento da sociedade pode fomentar a transparência na divulgação dos dados da empresa, possibilitando o atingimento desse ODS.

4.3.17 ODS 17. Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável

As palavras-chave utilizadas para esse objetivo foram *mining AND “sustainable development goals”*. Os trabalhos recuperados discorrem sobre o contexto da aplicação dos ODS no setor minerário. O último objetivo está relacionado à interação entre os países, através de parcerias, para a implementação de todos os outros ODS, de forma a alcançar um futuro sustentável em todas as dimensões. As indústrias de mineração devem se comprometer com questões ambientais, cuidar do acesso responsável e gestão de recursos naturais, implementar práticas ambientalmente sustentáveis e agir com responsabilidade social (VINTRÓ; SANMIQUEL; FREIJO, 2014).

Segundo Gallo e Setti (2014), o processo de gestão das agendas territorializadas, fornece subsídios para a tomada de decisão e para a formulação de políticas, programas e projetos que promovam territórios sustentáveis e saudáveis, assim como, podem vir a se constituir em

ferramenta de apoio ao monitoramento e avaliação dos ODS. Selmier II e Newenham-Kahindi (2017) levantaram três questões sobre a aplicação dos ODS na mineração, conforme descrito no Quadro 1. Foi feito um comparativo com a realidade encontrada nas indústrias de brita visitadas e como as ações podem ser aplicadas a qualquer tipo de mineração.

Além dessas ações, a avaliação adequada das condições geológicas locais, dos fatores técnicos e legislativos da região, da situação atual e futura da mineração no âmbito do planejamento territorial, assim como a prospecção de cenários com ou sem a mineração, também, devem ser considerados no contexto da implementação dos ODS (FLORKOWSKA; BRYT-NITARSKA, 2018).

Quadro 1 – Ações para aplicação dos ODS na mineração

Ações propostas por Selmier II e Newenham-Kahindi (2017)	Realidade das mineradoras de brita visitadas	Aplicação na mineração em geral
As complexidades locais exigem soluções locais, envolvendo membros de comunidades locais	Não há envolvimento da comunidade nos projetos educacionais e nas palestras de esclarecimento sobre a atividade	Os moradores podem ajudar a comunidade e as empresas a se adaptarem às mudanças, conhecendo a atividade, a fim de atingir os ODS.
Diretrizes e leis específicas para o setor	Existem Leis, Decretos, Normas e Regulamentos que regem o setor de mineração de brita, além do Código de Mineração que abrange todo o setor minerário.	As mineradoras precisam seguir as diretrizes específicas para enquadrar e implementar seus esforços para atingir os ODS, com base no tipo específico de mineração.
Transparência na divulgação de dados e informações	Não houve pedido de audiências públicas para nenhum dos empreendimentos, comprometendo a divulgação dos dados referentes à atividade. No entanto, a sociedade tem acesso aos estudos ambientais, disponibilizados pelo órgão ambiental do estado.	A transparência nas informações promove a legitimidade e melhora nas operações de negócios, contribuindo de forma significativa para atingir os ODS na atividade de mineração.

Fonte: Autores

4.4 Conclusão

Os 17 ODS surgiram como diretrizes para um plano de ação que visa a busca de um futuro ambientalmente sustentável, aliado ao crescimento econômico e à inclusão social. Esses objetivos fazem parte de uma Agenda estabelecida pela ONU para o avanço da paz universal através da parceria entre países.

A importância da atividade minerária para a sociedade consiste no fornecimento de insumos básicos para diversos processos produtivos. Os recursos minerais extraídos da natureza

são o primeiro elo de várias cadeias produtivas, que vão desde a fabricação de celulares até carros. A mineração de brita, especificamente, fornece os agregados que abastecem o setor da construção civil, com aplicação em obras de infraestrutura, saneamento básico, construção de moradias etc. Além disso, a atividade, independentemente do tipo de minério explorado, gera empregos diretos e indiretos, promovendo inclusão social e desenvolvimento econômico.

A pesquisa na literatura científica e as visitas às indústrias de mineração de brita localizadas em Monsenhor Gil, Piauí, Brasil, possibilitaram a constatação de que, no contexto da mineração, existem estratégias que podem levar ao atendimento de cada um desses objetivos. Através do esforço e colaboração das mineradoras com governo e comunidades locais, é possível vislumbrar as potencialidades do setor em atender, de forma prática, os 17 ODS propostos.

Foi constatado que as indústrias de brita visitadas contribuem para a geração de empregos (ODS 9) e renda (ODS 1 e 2) na região onde estão instaladas, bem como, promovem melhorias para a comunidade em relação à infraestrutura do entorno (ODS 9). No entanto, existem falhas como a baixa incidência de mulheres no quadro de funcionários (ODS 5), a falta de promoção de condições para a ampliação do acesso à educação, tanto para os empregados como para a comunidade (ODS 4), e a ausência de audiências públicas, que compromete a divulgação dos dados de forma transparente (ODS 16). Além disso, essas indústrias não fazem a reposição ambiental da área, comprometendo o atingimento dos ODS 2, 10, 13 e 15.

O envolvimento da comunidade do entorno das minas, tanto em campanhas educativas promovidas pelas indústrias, como denunciando a atividade desenvolvida fora dos parâmetros legais pode viabilizar cenários favoráveis para que as ações sejam, efetivamente, realizadas em benefício do coletivo (indústrias, sociedade e meio ambiente). Incentivos por parte do governo, em esfera local, regional e global, podem fomentar a inclusão e a justiça social, promovendo a sustentabilidade ambiental, aliada ao desenvolvimento econômico.

Assim, as mineradoras possuem importante participação na promoção de empregos inclusivos e justos, contribuindo com a erradicação da pobreza; disseminação do conhecimento sobre o setor, através da educação; divulgação de informações e dados de forma transparente; colaboração para o uso e compartilhamento de energia limpa e infraestrutura; mitigação dos impactos ambientais no solo, água e ar; e promoção da paz em todas as esferas possíveis, contribuindo para o atingimento de cada um dos ODS.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto de pesquisa [401320/2016-2] e o pesquisador José Machado Moita Neto agradece ao CNPq pelo financiamento através da Bolsa de Produtividade em Pesquisa [307215/2015-6].

Referências

- ABRAHAM, J.; DOWLING, K.; FLORENTINE, S. Influence of controlled burning on the mobility and temporal variations of potentially toxic metals (PTMs) in the soils of a legacy gold mine site in Central Victoria, Australia. **Geoderma**, v. 331, pp.1-14, 2018.
- AKUDUGU, M.; MAHAMA, E.; ATAMI, E. The welfare impact of small-scale mining in the Talensi–Nabdam District of Ghana. **Mineral Economics**, v. 25, n. 2, pp.97-106, 2013.
- ALEKE, B. I.; NHAMO, G. Information and communication technology and climate change adaptation: evidence from selected mining companies in South Africa. **Jamba: Journal of Disaster Risk Studies**, v. 8, n. 3, pp. 1-9, 2016.
- ALLEN, M. G. Islands, extraction and violence: Mining and the politics of scale in Island Melanesia. *Political Geography*, v. 57, pp. 81-91, 2017.
- ARMAGHANI, D. J.; MOMENI, E.; ABAD, S. V. A. N. K.; KHANDELWAL, M. Feasibility of ANFIS model for prediction of ground vibrations resulting from quarry blasting. **Environmental Earth Science**, v. 74, p. 2845–2860, 2015.
- ARHIN, E.; BOANSI, A. O.; ZANGO, M. S. Trace elements distributions at Datoko-Shega artisanal mining site, northern Ghana. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 38, n. 1, pp 203–218, 2016.
- ASSAN, J. K.; MUHAMMED, A. R. The impact of mining on farming as a livelihood strategy and its implications for poverty reduction and household well-being in Ghana. **International Journal of Development and Sustainability**, v. 7, n. 1, pp. 1-20, 2018.
- AZEVEDO, B. M.; ERDMANN, R. H.; TRIERWEILLER, A. C.; BENTO, V. F. Análise do sistema de produção e dos fatores de competitividade em uma empresa do setor de mineração do sul do Brasil. **Revista de Administração da UFSM**, v. 9, n. 2, pp. 228-247, 2016.
- BAUMBACH, M. O.; PRADO FILHO, J. F.; FONSECA, A. Environmental management in small mining enterprises: comparative analysis of three Brazilian cases through the lenses of ISO 14001. **Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 1, pp. 111-116, 2013.
- BHATTACHARYYA, S.; RESOSUDARMO, B. P. Growth, growth acceleration, and the poor: lessons from Indonesia. **World Development**, v. 66, pp.154-165, 2015.
- BIGGEMANN, S; KOWALKOWSKI, C; MALEY, J; BREGE, S. Development and implementation of customer solutions: A study of process dynamics and market shaping. **Industrial Marketing Management**, v. 42, n. 7, pp. 1083-1092, 2013.

BOTHA, D. Women in mining still exploited and sexually harassed. *South African Journal of Human Resource Management*, v.14, n.1, pp. 1-12, 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 9/87**, de 03 de dezembro de 1987. Dispõe sobre a realização de Audiências Públicas no processo de licenciamento ambiental. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=60>>. Acesso em 15 jul 2018.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 237**, de 19 de dezembro de 1997. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>>. Acesso em 16 jul 2018.

_____. Decreto – Lei 9.985 de 18 de julho de 2.000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, 2000. Disponível em:

<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm>. Acesso em 19 jul 2018.

_____. Decreto 6.856, de 25 de maio de 2009. Regulamenta o art. 206-A da Lei nº 8.112, de 11 de dezembro de 1990 – Regime Jurídico Único, dispoendo sobre os exames médicos periódicos de servidores. Brasília, 2009. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6856.htm. Acesso em 20 jun 2018.

_____. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em 25 jun 2018.

_____. Lei 12.846, de 01 de agosto de 2013. Dispõe sobre a responsabilização administrativa e civil de pessoas jurídicas pela prática de atos contra a administração pública, nacional ou estrangeira, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12846.htm Acesso em 20 out 2018.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Plano decenal de expansão de energia 2026**. Brasília, 2017a, 309 p. Disponível em:

http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026_versao_para_publicacao_08dez2017.pdf/f5d8f999-566d-4f5b-9167-d80b6ea8924e Acesso em 18 jun 2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Balanco energético nacional: relatório síntese ano base 2016**. Rio de Janeiro, 2017b. Disponível em:

https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf. Acesso em 17 jun 2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **IBAMA - Manual de Normas e Procedimentos para licenciamento ambiental no setor de extração mineral**. Brasília, 2001. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/arquivos/MANUAL_mineracao.pdf>.

Acesso em 21 jun. 2018.

BRASIL, L. M.; PIRES, V. O que a lama nos deixou: reflexões sobre a tragédia de Mariana, a mídia e a mineração no Brasil. *Chroniques des Amériques*, v. 17, n. 3, 2017.

BRASIL MINERAL. **Mulheres na mineração** (2017). Disponível em: <http://www.brasilmineral.com.br/revista/Mulheres%20na%20Minera%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 29 jun 2018.

BRAVO-ORTEGA C.; Muñoz, L. Mining services suppliers in Chile: A regional approach (or lack of it) for their development. **Resources Policy**. Available online, 2018.

BROAD, R.; CAVANAGH, J. Poorer Countries and the Environment: Friends or Foes? **World Development**, v. 72, pp.419-431, 2015.

BRUNIER, G.; ANTHONY E. J.; GOICHOT, M.; PROVANSAL, M.; DUSSOUILLEZ, P. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation. **Geomorphology**, v. 224, pp. 177–191, 2014.

BUD, I.; DUMA, S.; PASCA, I.; GUSAT, D. Arguments for the need of mining education continuity and development in Romania. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 294, pp. 2-9, 2018.

CANAVESIO, R. Formal mining investments and artisanal mining in southern Madagascar: Effects of spontaneous reactions and adjustment policies on poverty alleviation. **Land Use Policy**, v. 36, pp.145-154, 2014.

CARDOSO, D. R.; ZIVIANI, F.; DUARTE, L. O. B. Gerenciamento de projetos: uma análise da maturidade do setor de mineração, **Revista de Gestão e Projetos – GeP**, v. 8, n 1, pp.1-15, 2017.

CARNEY, J. G.; GUSHULAK, B. D. A Review of Research on Health Outcomes for Workers, Home and Host Communities of Population Mobility Associated with Extractive Industries. **Journal of Immigrant and Minority Health**, v. 18, n. 3, pp. 673–686, 2016.

CHOI, C.; CAO, J.; ZHAO, F. C. System Dynamics Modeling of Indium Material Flows under Wide Deployment of Clean Energy Technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 114, pp. 59-71, 2016.

CNPq. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico. Disponível em: <http://www.cnpq.br/web/guest/apresentacao13/> Acesso em: 20 jul 2018.

CONSTANTIN, V.; STEFANESCU, L.; KANTOR, C. M. Vulnerability assessment methodology: A tool for policy makers in drafting a sustainable development strategy of rural mining settlements in the Apuseni Mountains, Romania. **Environmental Science and Policy**, v. 52, pp.129-140, 2015

COTA, E.; TORRES, M. P.; FERREIRA, J. A. T.; FIDÊNCIO, A. X.; RODRIGUES, G. B.; ROCHA, F. A. S.; AZPÚRUA, H.; FREITAS, G. M.; MIOLA, W. Robótica na mineração. **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**, v. 47, n. 2, pp. 359-370, 2017.

CRONJÉ, F.; REYNEKE, S.; JÀMBÁ, D. W. Local communities and health disaster management in the mining sector. **Journal of Disaster Risk Studies**, v. 5, n. 2, pp.1-12, 2013

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **DIPAR: Diretoria de Procedimentos Arrecadatórios**. Brasília, 2004. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/arrecadacao/extra/Relatorios/distribuicao_cfem.aspx>. Acesso em 20 jun 2018.

FIGUEIREDO, P. N.; PIANA, J. When "one thing (almost) leads to another": A micro-level exploration of learning linkages in Brazil's mining industry. **Resources Policy**, v. 49, pp. 405-415, 2016.

FLORKOWSKA, L.; BRYT-NITARSKA, I. The requirements for implementing Sustainable Development Goals (SDGs) and for planning and implementing Integrated Territorial Investments (ITI) in mining areas. **E3S Web of Conferences**, v. 36, pp. 1-7, 2018.

FORT, M.; GRIMALT, J. O.; CASAS, M.; SUNYER, J. Interdependence between urinary cobalt concentrations and hemoglobin levels in pregnant women (Medical condition overview). **Environmental Research**, v. 136, pp.148-155, 2015.

GALLO, E.; SETTI, A. F. F. Território, intersetorialidade e escalas: requisitos para a efetividade dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 11, pp. 4383-4396, 2014.

HAO, X.; WANG, D.; WANG, P.; WANG, Y.; ZHOU, D. Evaluation of water quality in surface water and shallow groundwater: a case study of a rare earth mining area in southern Jiangxi Province, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.188, n. 1, pp.1-11, 2016

HEIDER, M. Potencialidades da mineração no Brasil. **In the Mine**, 2013. Disponível em: <https://inthemine.com.br/site/potencialidades-da-mineracao-no-brasil/>. Acesso em: 20 jul 2018.

HELBERT, M. Australian Women in Mining: Still a Harsh Reality. In: STEVENS L., TAIT P., VARNEY D. (Eds). **Feminist Ecologies**. Palgrave Macmillan, Cham, 2018. pp 231-246.

HOWARD, N. Teenage Labor Migration and Antitrafficking Policy in West Africa. **The Annals of the American Academy of Political and Social Science**, v. 653, n. 1, pp.124-140, 2014.

HUANG, X.; FAYSSSE, N.; REN, X. A multi-stakeholder platform involving a mining company and neighbouring villages in China: Back to development issues. **Resources Policy**, v. 51, pp. 243-250, 2017.

IRAMINA, W. S.; TACHIBANA, I. K.; SILVA, L. M. C.; ESTON, S. M. Identificação e controle de riscos ocupacionais em pedreira da região metropolitana de São Paulo. **Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 4, p. 503-509, 2009.

ISO 500001: 2011. **Energy management systems - Requeriments with guidance for use**. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/51297.html>. Acesso em: 25 jul 2018.

JABBOUR, A. B. L.S.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operation. **Annals of Operation Research**, v. 270, pp 273-286, 2018.

JASKOSKI, M. Environmental Licensing and Conflict in Peru's Mining Sector: A Path-Dependent Analysis. **World Development**, v. 64, p. 873–883, 2014.

JEREZ, C. A. Biomining of metals: how to access and exploit natural resource sustainably. **Microbial Biotechnology**, v. 10, n. 5, pp. 1191–1193, 2017

JOHANSSON, M.; RINGBLUM, L. The Business Case of Gender Equality in Swedish Forestry and Mining - Restricting or Enabling Organizational Change. **Gender, Work & Organization**, v. 24, n. 6, pp. 628-642, 2017.

JOSA, R.; JORBA, M.; VALLEJO, V. R. Opencast mine restoration in a Mediterranean semi-arid environment: Failure of some common practices. **Ecological Engineering**, v. 42, p. 183–191, 2012.

KAI, K.; BUANES, A.; TIMO, K.; MASLOBOEV, V.; PETTERSSON, M. Sustainable mining, local communities and environmental regulation. *Barents Studies: Peoples Economies and Politics*, v. 2, n. 1, pp. 50-81, 2015.

KATZ, J.; PIETROBELLI, C. Natural resource based growth, global value chains and domestic capabilities in the mining industry. **Resources Policy**. Available online, 2018

KOTSADAM, A.; TOLONEN, A. African Mining, Gender, and Local Employment. **World Development**, v. 83, pp.325-340, 2016.

LEBRE, E.; CORDER, G.; GOLEV, A. The Role of the Mining Industry in a Circular Economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 662-672, 2017.

LEITÃO, A. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting**, v. 1, n. 2, p. 149-151.

LEVESQUE, M.; MILLAR, D.; PARASZCZAK, J. Energy and mining e the home truths. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, pp. 233-255, 2014.

LIMA, A.; MITCHELL, K.; O'CONNELL, D.; VERHOEVEN, J.; VAN CAPPELLEN, P. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. **Environmental Science & Policy**, v. 66, pp. 227-233, 2016.

LIPHADZI, S. M.; VERMAAK, A. P. Assessment of employees' perceptions of approaches to sustainable water management by coal and iron ore mining companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, pp. 608-625, 2017.

LIRA, M.; RABBANI, E. K.; BARKOKEBAS JUNIOR, B.; LAGO, E. Risk evaluation and exposure control of mineral dust containing free crystalline silica: a study case at a quarry in the Recife Metropolitan Area. **Work**, v. 41, p. 3109-3116, 2012.

LOAYZA, N.; RIGOLINI, J. The Local Impact of Mining on Poverty and Inequality: Evidence from the Commodity Boom in Peru. **World Development**, v. 84, pp. 219-234, 2016.

LOPES, S.; SILVA, M.; GOMES, E.; CARVALHO, P.; NEIVA, A. Seasonal contamination of surface waters close to an abandoned Sn-W mine, northeast Portugal, **Environmental Earth Sciences**, v.75, n. 22, pp.1-18, 2016.

LU, J. L. Occupational health and safety in small scale mining: focus on women workers in the Philippines. **Journal of International Women's Studies**, v. 13, n. 3, pp.103-114, 2012.

LU, J.; LORA-WAINWRIGHT, A. Historicizing Sustainable Livelihoods: A Pathways Approach to Lead Mining in Rural Central China. **World Development**, v. 62, pp.189-200. 2014.

LUNA, L.; PASTORELLI, R.; BASTIDA, F.; HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C.; MIRALLES, I.; SOLÉ-BENET, A. The combination of quarry restoration strategies in semiarid climate induces different responses in biochemical and microbiological soil properties. **Applied Soil Ecology**, v. 107, p. 33–47, 2016.

MA, W.; SCHOTT, D.; LODEWIJKS, G. A new procedure for deep sea mining tailings disposal. **Minerals**, v.7, n.4, p. 47-61, 2017.

MACONACHIE, R.; HILSON, G. Re-Thinking the Child Labor "Problem" in Rural sub-Saharan Africa: The Case of Sierra Leone's Half Shovels. **World Development**, v. 78, pp. 136-147, 2016.

MCCLINTOCK, B; BELL, P. Australia's mining interests within Nigeria and Libya: Policies, corruption and conflict. **International Journal of Law, Crime and Justice**, v. 41, pp. 247-259, 2013.

MILISA, M.; ZIVKOVIC, V.; HABDIJA, I. Destructive effect of quarry effluent on life in a mountain stream. **Biologia**, v. 65, n. 3, p. 520—526, 2010.

MONTEIRO, N. B. R.; MOITA NETO, J. M.; SILVA, E. A. Bibliometric study of the crushed stone mining sector. **Mineral processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 34, n. 2, pp. 235-249, 2018.

MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A. Environmental licensing in Brazilian's crushed stone industries. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 71, pp. 49-59, 2018.

MORENO-LEIVA, S.; DÍAZ-FERRÁN, G.; HAAS, J.; TELSNIIG, T.; DÍAZ-ALVARADO, F. A.; PALMA-BEHNKE, R.; KRACHT, W.; ROMÁN, R.; CHUDINZOW, D.; ELTROP, L. Towards solar power supply for copper production in Chile: Assessment of global warming potential using a life-cycle approach. **Journal of Cleaner Production**, v.164, pp. 242-249, 2017.

MWAKUMANYA M. A.; MAGHENDA, M.; JUMA, H. Socio-economic and environmental impact of mining on women in Kasigau mining zone in Taita Taveta County. **Journal of Sustainable Mining**, v. 15, n. 4, pp. 197-204, 2016.

O'FAIRCHEALLAIGH, C. Extractive industries and Indigenous peoples: A changing dynamic? **Journal of Rural Studies**, v. 30, pp.20-30, 2013.

OKADO, G. H. C.; QUINELLI, L. Megatendências mundiais 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): uma reflexão preliminar sobre a “nova agenda” das Nações Unidas. **Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos**, v. 2, n. 2, p. 109-110, 2016.

OLIVEIRA, C. M.; ESPÍNDOLA, I. B. Harmonization of legal environmental standards in MERCOSUL countries. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, n. 4, p. 1-18, 2015

ORTIZ-RIOMALO, J. F.; RETTBERG, A. Minería de oro, conflicto y criminalidad en los albores del siglo XXI en Colombia: Perspectivas para el posconflicto colombiano. **Colombia Internacional**, v. 93, pp. 17-63, 2018

OZER, U.; KAHRIMAN A.; AKSOY M.; ADIGUZEL D.; KARADOĞAN A. The analysis of ground vibrations induced by bench blasting at Akyol quarry and practical blasting charts. **Environmental Geology**, v. 54, p. 737–743, 2008.

PALAMURE, S. D. Energy efficiency and carbon dioxide emissions across different scales of iron ore mining operations in Western Australia. 2016. Tese (doutorado) - Edith Cowan University. Austrália. Disponível em <http://ro.ecu.edu.au/theses/1936>. Acesso em 04 jun 2018.

PASTERNAK, S. Habitação e Saúde. **Estudos Avançados**. v. 30, n. 86, p. 51-66, 2016.

PEARSON, C. A. L.; DAFF, S. Indigenous workforce participation at a mining operation in northern Australia. **Australian Bulletin of Labour**, v.39, n 1, pp.42-64, 2013.

PENG, X.; SHI, G. L.; ZHENG, J.; LIU, J. Y.; SHI, X. R.; XU, J.; FENG, Y. C. Influence of quarry mining dust on PM2.5 in a city adjacent to a limestone quarry: Seasonal characteristics and source contributions. **Science of the Total Environment**, v. 550, p. 940–949, 2016.

PFEIFFER, M.; VANYA D.; DAVISON C.; LKHAGVASUREN O.; JOHNSTON L.; JANES C. R. Harnessing opportunities for good governance of health impacts of mining projects in Mongolia: results of a global partnership. **Globalization and Health**, v. 13, n.39, 1-13, 2017.

PNUD – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. Atlas: Mapeando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Mineração (2017). Available in <http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/ods/atlas--mapeando-os-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-na-m.html>. Access in 14 jun 2018.

PwC-UK. Mining for talent – A study of women on boards in the mining industry. Available in: <https://www.pwc.co.uk/industries/mining/insights/mining-for-talent-a-study-of-women-on-boards-in-the-mining-industry.html>. Access in: 09 jul 2018.

RANJAN, R. The role of political-industry nexus in promoting illegal extraction of mineral resources and deforestation: A case of iron ore mining in Goa. **Resources Policy**, v. 57, pp. 122-136, 2018.

RITTER, C. D.; MCCRATE, G.; NILSSON, R. H.; FEARNSTIDE, P. M.; PALME, U.; ANTONELLI, A. Environmental impact assessment in Brazilian Amazonia: Challenges and prospects to assess biodiversity. **Biological Conservation**, v. 206, p.161-168, 2017.

ROCHA, J. A.; BOSCOLO, O. H.; FERNANDES, L. R. R. M. V. Etnobotânica: um instrumento para valorização e identificação de potenciais de proteção do conhecimento tradicional. **Interações**, v.16, n.1, p. 67-74, 2015.

ROSA, L. A. B.; GOMES, C. M.; KNEIPP, J. M.; BICHUETI, R. S. O Poder de Inovação e a Implementação da Estratégia Para a Sustentabilidade no Setor Mineral Brasileiro. **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, v. 13, n. 1, pp.49-63, 2014.

SAHA, D. C.; PADHY, P. K. Effects of stone crushing industry on *Shorea robusta* and *Madhuca indica* foliage in Lalpahari forest. **Atmospheric Pollution Research**, v. 2, n. 4, p. 463-476, 2011.

SANTOS, A. A. O Estado Democrático de Direito. In: **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, XIV, n. 91, 2011. Available in: <http://ambitojuridico.com.br/site/?n_link=revista_artigos_leitura&artigoId=10143>. Access: in 01 jul 2018.

SANTOS, M. M.; JORGE, P. A. S.; COIMBRA, J.; VALE, C.; CAETANO, M.; BASTOS, L.; IGLESIAS, I.; GUIMARÃES, L.; REIS-HENRIQUES, M. A.; TELES, L. O.; VIEIRA, M. N.; RAIMUNDO, J.; PINHEIRO, M.; NOGUEIRA, V.; PEREIRA, R.; NEUPARTH, T.; RIBEIRO, M. C.; SILVA, E.; CASTRO, L.; FILIPE C. The last frontier: Coupling technological developments with scientific challenges to improve hazard assessment of deep-sea mining. **Science of the Total Environment**, v.627, pp.1505-1514, 2018.

SCHNEIDER, P.; ANH, L. H.; WAGNER, J.; REICHENBACH, J.; HEBNER, A. Solid Waste Management in Ho Chi Minh City, Vietnam: Moving towards a Circular Economy? **Sustainability**, v. 9, n. 2, pp. 286-306, 2017.

SCHOENBERGER, E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. **Resources Policy**, v. 49, p. 119-129, 2016.

SELMIER II, W. T.; NEWENHAM-KAHINDI, A. Under African skies – mining TNCs in Africa and the Sustainable Development Goals. **Transnational Corporations**, v. 24, n. 3, 2017.

SENA, A.; FREITAS, C. M.; BARCELLOS, C. RAMALHO, W.; CORVALAN, C. Measuring the invisible: analysis of the Sustainable Development Goals in relation to populations exposed to drought. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, n. 3, pp. 671-683, 2016.

SINGH, N. Weathering the 'perfect storm' facing the mining sector. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 117, n. 3, p.223-229, 2017.

SHI, Z. Mining Technology in Mining-Based on the Cream Filling. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 20, n. 17, pp.9953-9959, 2015.

SILVA, A. S.; BUSS, D. F.; GALVÃO, L. A. C.; POSADA, F. B. Not so simple as it seems: tackling climate change and implementing the sustainable development goals in the Americas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 40, n. 3, pp. 147-149, 2016.

SILVA, N. R.; AZEVEDO, A.; FERREIRA, M. I. P. Fish resource management in Brazil and overview of artisanal fisheries in Macaé, RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v.6, n. 2, pp. 37-59, 2013.

STRAWN, D. G.; HICKEY P. J.; MCDANIEL, P. A.; BAKER, L. L. Distribution of As, Cd, Pb, and Zn in redox features of mine-waste impacted wetland soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, p. 1100–1110, 2012.

SULLIVAN, M.; GREEN, D. Misled about lead: an assessment of online public health education material from Australia's lead mining and smelting towns. **Environmental Health**, v. 15, n. 1, pp. 1-12, 2016.

TABATABAEI, J.; MOHAMMADI, F. Environmental Effects of Mining Industries in Meymeh Region, North West of Isfahan. **APCBEE Procedia**, v. 5, p. 388-393, 2013.

TAKANO, C. C.; FLORES, J. C. C.; LIMA, H. M. An Analysis of the Rate for Controlling, Monitoring and Supervision of Exploration and Mining Activities of Mineral Resources (TFRM). **Revista Escola de Minas**, v. 69, n. 1, p. 105-110, 2016.

TERAMA, E.; MILLIGAN, B.; JIMÉNEZ-AYBAR, R.; MACE, G. M.; EKINS, P. Accounting for the environment as an economic asset: global progress and realizing the 2030 Agenda for Sustainable Development. **Sustainable Science**, v. 11, pp. 945–950, 2016.

TRIGINELLI, D. H.; CUNHA, D. M. Mineração de granito no município de Vila Pavão/ES: compreender o trabalho para pensar a formação. **Laboreal**, v. 9, n. 1, pp. 10-23, 2013.

TORPEY, E. Resources work: careers in mining, oil, and gas. **Occupational Outlook Quarterly**, v. 57, n. 1, pp. 22-32, 2013.

UBAQUE, C. A. G.; VACA, M. C. G.; RODRÍGUES, C. F. A. Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. **Tecnura**, v. 18, n. 42, p. 90-102, 2014.

UN – UNITED NATION - Sustainable Development Knowledge Platform. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (2015). Available in <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Access in 14 jun 2018.

VELICU, I.; KAIKA, M. Undoing environmental justice: Re-imagining equality in the Rosia Montana anti-mining movement. **Geoforum**, v. 84, p.305-315, 2017.

VILLARROYA, A.; BARROS, A. C.; KIESECKER, J. Policy Development for Environmental Licensing and Biodiversity Offsets in Latin America. **Plos One**, v. 9, n. 9, p. 1-13, 2014.

VINTRÓ, C; SANMIQUEL, L; FREIJO, M. Environmental sustainability in the mining sector: evidence from Catalan companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, pp. 155-163, 2014.

WAHSHA, M.; NADIMI-GOKI, M.; FORNASIER, F.; AL-JAWASREH, R.; HUSSEIN, E. I.; BINI, C. Microbial enzymes as an early warning management tool for monitoring mining site soils, **Catena**, v.148, pp.40-45, 2017.

WORLD ECONOMIC FORUM (2016). **Mapping Mining to the Sustainable Empowered lives. Resilient nations. Development Goals: An Atlas**. Available in file:///C:/Users/qq/Downloads/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_Executive_Summary_FINAL.pdf. Access in 04 jul 2018.

5 DIREITO MINERÁRIO: EM BUSCA DE UMA MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL⁸

Resumo

A mineração é uma atividade que gera insumos para distintas cadeias produtivas, o que a torna essencial para o desenvolvimento do país. Contudo, causa impactos ambientais, econômicos e sociais que devem ser considerados. O Direito Minerário fornece as diretrizes, por meio de leis, normas e regulamentos, para que a mineração possa ser desenvolvida de forma ambiental, econômica e socialmente sustentável. Nesse trabalho foi feita uma análise da aplicação de algumas características peculiares do Direito Minerário brasileiro (rigidez locacional, outorga por prioridade, entre outros) de acordo com os parâmetros estabelecidos na Constituição Federal, no Código de Mineração e suas atualizações e nos atos normativos do Departamento Nacional de Produção Mineral, do Ministério do Meio Ambiente e do Ministério de Minas e Energia. Também, foram analisadas Jurisprudências do Superior Tribunal de Justiça para entender como o direito minerário é aplicado, na prática. Foi constatado que a legislação brasileira não é perfeita, mas possui mecanismos para proteger e beneficiar o mineiro, a sociedade e o meio ambiente. No entanto, existem muitas deficiências, a falta de celeridade no julgamento dos processos e as falhas na aplicabilidade de alguns princípios comprometem a sustentabilidade no desenvolvimento da atividade, sobretudo em relação ao passivo ambiental e social deixado após o fechamento da mina.

Palavras-chave: sustentabilidade mineral; legislação ambiental; direito minerário; impactos ambientais, impactos sociais, justiça social.

Abstract

Mining is an activity that generates inputs to different production chains, making it essential for any country's development. However, it causes environmental, economic, and social impacts that must be considered. The Mining Law provides guidelines, through laws and regulations, so the activity can be carried out in an environmentally, economically, and socially sustainable way. In this paper, an analysis was made about the application of some peculiar characteristics of Brazilian Mining Law (locational rigidity, priority granting, among others) according to the parameters established in the Federal Constitution, in the Mining Code and its updates, and in the National Department of Mineral Production, Environment Ministry, and Mines and Energy Ministry normative acts. Also, the Superior Court of Justice Jurisprudence was analyzed to understand how the Mining Law is applied, in practice. It was verified that the Brazilian legislation is not perfect, but it has mechanisms to protect and benefit the miner, the society, and the environment. However, there are many shortcomings like the lack of speed in judging processes and the flaws in the applicability of some principles that compromise sustainability in the activity's development, especially regarding the environmental and social liabilities left after the mine closure.

Keywords: *mineral sustainability; environmental legislation; mining law; environmental impacts; social impacts; social justice*

⁸ MONTEIRO, N. B. R. BEZERRA, A. K. L.; MOITA NETO, J. M.; SILVA, E. A. d. Mining Law: In Search of Sustainable Mining. *Sustainability*, v. 13, p. 1-16, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13020867>

5.1 Introdução

A mineração gera insumos que estão presentes nos mais variados setores da economia: produção de energia, construção civil, agronegócio, eletroeletrônicos, joias, entre outros, o que faz com que os recursos minerais sejam considerados estratégicos para muitos setores da economia e para as nações. No entanto, mesmo sendo necessária e movimentando uma vasta cadeia produtiva, a atividade causa diversos impactos devido à extração de recursos naturais não renováveis, além de possuir riscos inerentes, tanto ambientais, como econômicos e sociais (MAGNO, 2015; MONTEIRO; MOITA NETO; SILVA, 2018).

Dentre os riscos ambientais destacam-se os impactos como desmatamento da área minerada, contaminação de cursos de água, poluição do ar e sonora, além da depleção dos recursos naturais (TABATABAEI; MOHAMMADI, 2013). Os riscos econômicos estão ligados aos altos investimentos, oscilações de mercado, alteração no preço de *commodities*, entre outros (GREENTREE; BUCCI; CHAN, 2013). Para a sociedade, os riscos relacionam-se, principalmente, aos efeitos após o encerramento das atividades e fechamento da mina, isto é, a necessidade de lidar com um passivo ambiental e social que não existia antes da abertura do empreendimento (KAI *et al.*, 2015). No Quadro 1 são mostrados os impactos positivos e negativos associados à atividade de mineração, nas três esferas (ambiental, social e econômica).

O Direito Minerário aponta procedimentos, normas e diretrizes que orientam o setor, de modo que a exploração mineral tenha o menor impacto negativo possível no meio ambiente. Além disso, fornece a regulamentação para que a transformação do recurso mineral resulte em benefícios do ponto de vista econômico e social, garantindo os direitos do minerador, do Estado e da sociedade, em prol do desenvolvimento econômico, ambiental e socialmente sustentável (ATAÍDE, 2017). Embora existam leis de mineração com o objetivo de garantir o desenvolvimento da atividade de forma sustentável, existem falhas porque não há uma legislação perfeita, assim como a aplicabilidade da lei não é perfeita.

A mineração, no Brasil, é regulada pela Constituição Federal (BRASIL, 1988), que estabelece as regras gerais e princípios norteadores da atividade; pelo Código de Mineração de 1967 (BRASIL, 1967) e suas atualizações, que são as leis especiais que regem o setor; por leis específicas, como a Lei 8001 de 1990, que define os percentuais da distribuição da compensação financeira (BRASIL, 1990); além de atos normativos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e do Ministério de Minas e Energia (MME) que regulamentam o exercício da mineração, porém, sem criar, modificar ou extinguir direitos (BRASIL, 2013a). Mais recentemente, também, o decreto 9406

de 12 de junho de 2018 (BRASIL, 2018b), que regulamenta o Código de Mineração e outras leis do setor.

Quadro 1 – Impactos positivos e negativos causados pela atividade minerária

Impactos da mineração	Positivos	Negativos
Econômicos	Arrecadação de impostos; Geração de empregos e renda; Atração de outras atividades econômicas para a região; Uso do bem mineral como fonte de renda;	Altos investimentos; Flutuações de mercado; Mudanças nos preços das commodities; Falências; Corrupção de órgãos fiscalizadores;
Sociais	Melhoria na infraestrutura da região; Promoção da dignidade humana por meio de emprego e melhoria na renda familiar; Maior poder aquisitivo da população, promovendo renda para outros setores comerciais da região; Atração de investimentos públicos como escolas e postos de saúde para os moradores; Uso do bem mineral em benefício da população (por exemplo, na fabricação de diversos equipamentos médico/hospitalares);	Perda dos empregos após o fechamento da mina; Situação de pobreza após o fechamento da mina; Perda de outras atividades industriais/comerciais na região; Abandono da comunidade; Influência negativa na cultura, especialmente, em povos indígenas e comunidades tradicionais (perda da identidade cultural); Uso indevido do bem mineral (por exemplo, fabricação de artefatos como armas para finalidade criminosa);
Ambientais	Recuperação de áreas degradadas; Reflorestamento; Reaproveitamento da área da mina para outras finalidades sociais (por exemplo parques, espaço para shows, estádios).	Degradação ambiental; Mudanças na paisagem, na estrutura da vegetação e no ecossistema da região; Alterações no clima; Poluição sonora; Emissão de material particulado; Poluição de solo, água e ar Desmatamento.

Fonte: Autores

O Direito Minerário, tem natureza dual, sendo considerado direito público na relação União/minerador e privado na relação minerador/comunidades/consumidores (ATAÍDE, 2017). Dentre os princípios gerais constitucionais estabelecidos, tem-se que a atividade minerária é de interesse nacional e utilidade pública, há soberania nacional no aproveitamento dos recursos e que a função social da propriedade mineral deve ser considerada para que haja contribuição efetiva para a sociedade através, principalmente, da promoção de melhorias em relação à infraestrutura do local onde as minas estão instaladas (FEIGELSON, 2018).

Na verdade, as mineradoras promovem benefícios relacionados às melhorias na infraestrutura do local e o acesso a recursos minerais de interesse público. Porém, isso compensa os impactos negativos gerados pela atividade? Essa é uma pergunta que deve ser respondida à luz do tripé da sustentabilidade (ambiental, econômica e social). Em que medida

os benefícios econômicos e sociais devem compensar os impactos ambientais causados pela mineração? A lei busca prever essa avaliação para que haja sustentabilidade na atividade.

Dentre os princípios importantes do Direito Minerário, destacam-se: da responsabilidade intergeracional, isto é, a obrigação de conservar o ambiente para a atual e futuras gerações; da rigidez locacional, que significa que não é possível ao minerador escolher o lugar a ser minerado, pois depende, exclusivamente, da disponibilidade do mineral na natureza; do máximo e eficiente aproveitamento dos recursos, evitando desperdício e utilizando todo o potencial da mina; da dualidade imobiliária, que afirma que a superfície e o subsolo pertencem ao proprietário do terreno (superficiário), mas as riquezas minerais são de propriedade da União, entre outros (BRASIL, 2011).

A legislação mineral brasileira considera todos os tipos de mineração: terrestre, submarina e no leito dos rios. O presente artigo analisará principalmente a mineração em terra. Assim, foi feita uma análise da legislação, no que tange ao ramo específico do Direito Minerário. O objetivo desse estudo é fazer uma reflexão sobre sua aplicação em benefício do meio ambiente e da sociedade e quais as implicações econômicas dessa aplicação. Além disso, verificar como as mineradoras têm lidado com o passivo ambiental e social após o encerramento da exploração e quais os reflexos para a sociedade, que precisa arcar com esse problema.

5.2 Metodologia

Foi analisada a legislação existente para o setor mineral que abrange a Constituição Federal, o Código de Mineração e suas atualizações e os atos normativos do DNPM, do MMA e do MME. Além disso, foi feita uma pesquisa no *site* do Supremo Tribunal de Justiça (STJ) a fim de conhecer as jurisprudências do STJ relacionadas ao direito minerário. A busca foi feita utilizando-se o termo “direito minerário”, tendo sido recuperados um total de quatorze Acórdãos e 141 Decisões Monocráticas.

Foi realizada, também, uma pesquisa sistemática na literatura científica com o intuito de recuperar as publicações relacionadas à aplicação de leis relativas à atividade minerária, comparando a legislação brasileira com a de outras partes do mundo. A busca foi feita no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), utilizando a palavra-chave “*mining law*”, no campo “busca avançada” e com os filtros “data de publicação” (últimos dez anos) e “tipo de material” (artigos). O corpus obtido foi constituído de 43 artigos que tratam de vários tópicos do Direito Minerário (Quadro 2).

A revisão sistemática é um tipo de pesquisa que segue protocolos específicos e busca dar alguma lógica a um grande corpus documental (GALVÃO; RICARTE, 2020). Neste artigo, selecionamos algumas categorias identificadas na Lei a respeito da sustentabilidade, comparando-as com as Jurisprudências SCJ e a literatura científica. No Quadro 2 estão descritas as categorias selecionadas, a jurisprudência encontrada e as fontes identificadas na literatura científica para cada categoria.

Quadro 2 – Categorias identificadas na lei, relacionadas à sustentabilidade

Categorias	Jurisprudências	Literatura científica
Soberania nacional no uso dos recursos minerais	Agravo Regimental no Recurso Especial, Nº 1.394.171 - RS (2013/0266001-0)	Ataíde (2017)
Dualidade imobiliária	Agravo Regimental no Recurso Especial, Nº 1.394.171 - RS (2013/0266001-0)	Feigelson (2018)
Outorga por prioridade	Mandado de Segurança, Nº 6768/DF (2000/0002376-0)	Kai <i>et al.</i> (2015) Gonçalves <i>et al.</i> (2018)
Servidão minerária	Agravo Regimental no Recurso Especial, Nº 1.369.723 - MG (2013/0048546-5)	Fernandes; Hollanda (2009)
Avaliação de dano e renda	Embargos de Declaração no Agravo em Recurso Especial, Nº 1.124.158 - MG (2017/0150730-8)	Ataíde (2017)
Recuperação de áreas degradadas	Recurso Especial Nº 1.374.284 - MG (2012/0108265-7)	Monteiro; Silva (2018) Mechi; Sanches (2010) Viana; Bursztyn (2010) Baumbach <i>et al.</i> (2013) Polume-Kiele (2014) Goh; Effendi (2017)
Relação entre o superficiário e o minerador	Agravo em Recurso Especial, Nº 1.205.612 - SC (2017/0288229-5) Embargos de Declaração no Agravo em Recurso Especial, Nº 1.124.158 - MG (2017/0150730-8)	Kai <i>et al.</i> (2015) Gaviria (2015) Ataíde (2017) Gonçalves <i>et al.</i> (2018)
Audiências públicas/envolvimento da sociedade	Agravo Regimental no Recurso Especial Nº 1.479.063 - RS (2014/0223436-1)	Zhouiri; Oliveira (2012) Jaskoski (2014) Vázquez <i>et al.</i> (2016) Monteiro; Silva (2018)
Processo de licenciamento ambiental	Agravo Regimental no Recurso Especial Nº 1.479.063 - RS (2014/0223436-1)	Takano <i>et al.</i> (2016) Brasil; Pires (2017) Monteiro; Silva (2018)
Responsabilidade intergeracional	Recurso Especial Nº 1.374.284 - MG (2012/0108265-7)	Mechi; Sanches (2010) Viana; Bursztyn (2010) Baumbach <i>et al.</i> (2013) Polume-Kiele (2014) Goh; Effendi (2017) Monteiro; Silva (2018)
Rigidez locacional	Agravo em Recurso Especial, Nº 1.205.612 - SC (2017/0288229-5)	Kai <i>et al.</i> (2015) Gaviria (2015) Gonçalves <i>et al.</i> (2018)
Uso máximo e eficiente de recursos/fechamento de mina	Recurso Especial Nº 1.374.284 - MG (2012/0108265-7)	Singh (2010) Tiess; Ruban (2013) Ubaque <i>et al.</i> (2014)

Fonte: Autores

Além das categorias de sustentabilidade selecionadas para análise, temas como corrupção, métodos de elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA), políticas públicas, entre outros, foram discutidos ao longo do texto, apontando as lacunas da Lei relacionadas à sustentabilidade na atividade de mineração.

5.3 Resultados e discussão

O primeiro passo para entender a aplicação do Direito Minerário é definir conceitos que se confundem, nesse contexto. Existe diferença entre substância mineral, recurso mineral e produto mineral. Substância mineral é toda substância presente na crosta terrestre; recurso mineral é tudo que pode ser extraído para a fabricação de produtos; e produto mineral é o minério beneficiado e pronto para ser utilizado. Outros termos que, também, precisam ser definidos é jazida e mina. Nem todo corpo mineralizado é uma jazida e nem toda jazida é uma mina. Jazida é um local nas rochas onde se encontra o minério, é a reserva mineral com valor econômico e mina é a exploração, pelo homem, na jazida. Assim, mina é a jazida sendo explorada economicamente (ATAÍDE, 2017).

O bem mineral é de propriedade da União, porém o produto da exploração é do superficiário, ou seja, do proprietário da terra (ou do minerador, caso sejam entes distintos). Assim, a competência para legislar sobre jazidas e recursos minerais é da União, a qual autoriza que os particulares os explorem segundo o interesse e a soberania nacional. A legislação brasileira de mineração se aplica à mineração terrestre e marítima/fluvial. Dessa forma, o produto mineral é do minerador, e não o recurso mineral (BRASIL, 2011; BRASIL, 2018b).

5.3.1 O princípio da dualidade imobiliária

O princípio da dualidade imobiliária reconhece que existem dois proprietários do mesmo espaço de terra (a União e o superficiário). A competência para orientar as diretrizes sobre a exploração dos recursos minerais, que antes do Decreto 9.406 de 12 de junho de 2018 era do DNPM, passou a ser da Agência Nacional de Mineração (ANM), e os critérios estabelecidos para isso são: disponibilidade do recurso, possibilidade de exploração, benefícios econômicos e sociais, entre outros (BRASIL, 2018b).

O STJ julgou um Agravo Regimental (AgRg) no Recurso Especial, Nº 1.394.171 - RS (2013/0266001-0), em 2018 (BRASIL, 2018c), referente à uma empresa que estava explorando uma área sem a devida autorização do DNPM:

“AGRAVO REGIMENTAL NO RECURSO ESPECIAL. CRIME AMBIENTAL. EXPLORAÇÃO DE RECURSO MINERAL SEM AUTORIZAÇÃO LEGAL DO DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. PRINCÍPIO DA INSIGNIFICÂNCIA. NÃO INCIDÊNCIA. APLICAÇÃO DE NORMA DESCRIMINALIZANTE PREVISTA NO PARÁGRAFO ÚNICO DO ART. 2º DO DECRETO-LEI N. 227/67. NÃO INCIDÊNCIA. EXTRAÇÃO NÃO AUTORIZADA DE SUBSTÂNCIAS MINERAIS E IMEDIATA APLICAÇÃO NA EXECUÇÃO DE OBRA PÚBLICA REALIZADA POR PARTICULAR” (BRASIL, 2018c, p.1).

O provimento foi negado, uma vez que tal ato é considerado crime ambiental passível de sanção, de acordo com a legislação. A empresa ré alegou o princípio da insignificância, previsto no artigo 2º do decreto de lei 227/67 (BRASIL, 1967), que autoriza a extração de substância mineral para aplicação imediata em obras públicas. No entanto, foi provado que a empresa comercializava o produto extraído, configurando, assim, o crime ambiental. Portanto, a exploração de recursos naturais, sem autorização do DNPM, ou da ANM, é considerada crime.

A autorização de exploração concedida pelo órgão competente minimiza os impactos negativos, pois implica na realização de estudos ambientais na área. Normalmente o procedimento é demorado devido ao grande volume de processos e à burocracia (GONÇALVES; MILANEZ; WANDERLEY, 2018). Em alguns casos, o atraso pode até levar a casos de corrupção e suborno por agentes ambientais para a emissão de autorizações (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017). No entanto, o cumprimento da lei contribui para reduzir os casos de exploração sem a devida autorização, promovendo a proteção do meio ambiente e da sociedade.

5.3.2 O alvará de pesquisa mineral

Para garantir a contribuição social da atividade (interesse público), é preciso levar em consideração os regimes de aproveitamento dos recursos minerais. Um deles é a pesquisa mineral, que é a execução de trabalhos que irão definir a potencialidade de exploração da região e contempla atividades visando identificar corpos mineralizados economicamente viáveis. Os requisitos para que possa ser feita são: levantamentos geológicos pormenorizados da área a pesquisar; estudos dos afloramentos; levantamentos geofísicos e geoquímicos; aberturas de escavações visitáveis e execução de sondagens no corpo mineral; amostragens sistemáticas;

análises físicas e químicas das amostras; e ensaio de beneficiamento dos minérios ou das substâncias minerais úteis, para obtenção de concentrados de acordo com as especificações do mercado ou aproveitamento industrial (BRASIL, 2018a).

Para isso, é preciso requerer o alvará de pesquisa mineral, que é concedido, somente, em áreas livres e é outorgado pressupondo uma série de obrigações, sob pena de sanções que variam da advertência à perda do direito de exploração. A aprovação do alvará garante ao titular direitos como, por exemplo, o de acessar a área do projeto via acordo amigável ou ação judicial e a possibilidade de requerer a lavra no prazo de um ano. No entanto, o arquivamento do relatório negativo torna a área livre para novos requerimentos (BRASIL, 2018a). É importante lembrar que a contribuição social da atividade não pode prevalecer sobre o interesse ambiental. Para haver sustentabilidade em todos os seus aspectos, os impactos ambientais devem ser considerados, juntamente com o interesse público pelo bem mineral.

O titular da portaria de lavra é responsável, não só pela abertura e operação da mina, mas também, pelo seu fechamento. Por isso é importante prever, nas estratégias de negócio e no fluxo de caixa, o valor das operações necessárias para compensar e reverter, quando possível, os impactos ambientais negativos da lavra, uma vez que o minerador deve devolver a área explorada em condições de uso para a sociedade (BRASIL, 2001). Assim, é preciso exercer a atividade de forma ambientalmente responsável, para que a exploração não resulte em uma área imprópria para uso após a exaustão do recurso mineral. É certo que a reposição mineral é impossível de ser feita. Uma vez que o recurso é retirado da natureza, não pode ser “replantado” como recursos vegetais, por exemplo. Por isso é importante fazer uma compensação ambiental pelos danos irreversíveis causados pela mineração.

Houve um caso em que o DNPM suspendeu o alvará de uma empresa que não iniciou a pesquisa mineral dentro do prazo de três anos, conforme estabelecido no Código de Mineração (BRASIL, 1967). A empresa entrou com um Mandado de Segurança, Nº 6768/DF (2000/0002376-0) (BRASIL, 2000), alegando a impossibilidade de acessar a área, pois aguardava autorização judicial para tal. A segurança foi concedida, uma vez que o prazo dos alvarás de pesquisa deve ter início a partir do efetivo ingresso na área a ser explorada:

“ADMINISTRATIVO. MANDADO DE SEGURANÇA. SUSPENSÃO E PRORROGAÇÃO DE PRAZO DE ALVARÁS DE PESQUISA. DIREITOS MINERÁRIOS. IMPEDIMENTOS CONCRETOS E PROVADOS DA IMPETRANTE INGRESSAR NA ÁREA A SER EXPLORADA. CONTAGEM DO PRAZO DOS ALVARÁS QUE DEVE SER ASSEGURADA A PARTIR DO EFETIVO INGRESSO DA MINERADORA NA ÁREA OBJETO DA PESQUISA. PEDIDO DE ASSISTÊNCIA LITISCONSORCIAL FORMULADO PELA EMPRESA PORTO FELIZ LTDA. NÃO PREENCHIMENTO DOS

PRESSUPOSTOS ELENCADOS NO ART. 54, DO CPC. INADMISSIBILIDADE”
(BRASIL, 2000, p.1),

5.3.3 O sistema de outorga

Em relação ao sistema de outorga, os regimes básicos de aproveitamento dos recursos minerais são: autorização de pesquisa, registro de licença, permissão de lavra garimpeira e registro de extração. Além disso, existe um sistema chamado ‘Outorga por Prioridade’ que, no Direito Minerário, significa que a União é obrigada a consentir na exploração àquele que primeiro a requerer regularmente. O sistema de prioridade garante ao primeiro requerente o direito de explorar uma área livre, isto é, onde não há requerimento anterior (BRASIL, 2018a).

Magno (2015), referindo-se ao sistema de Outorga por Prioridade, destaca os conflitos envolvendo a mineração em áreas indígenas ou que deveriam ser de proteção ambiental. Muitas áreas livres estão localizadas onde existem, por exemplo, remanescentes de Mata Atlântica, que devem ser conservados por ser um bioma intensamente explorado. Gonçalves, Milanez e Wanderley (2018) complementam a preocupação com o espaço agrário, destacando a expansão da mineração nas comunidades rurais.

Há também questões de direitos humanos relacionadas à invasão de mineradoras, autorizadas pelo governo, em comunidades indígenas brasileiras na Amazônia. A extinção da reserva mineral na Amazônia causa forte resistência da sociedade, ambientalistas, políticos e personalidades nacionais e internacionais (GONÇALVES; MILANEZ; WANDERLEY, 2018). O problema é que essa situação abre portas para as mineradoras e seus impactos socioambientais e outros processos que destroem o meio ambiente e as pessoas que vivem nesse território.

O fato de não haver requerimento de lavra em um determinado espaço, não torna a área, necessariamente, livre. Existem áreas protegidas como as Áreas de Proteção Permanente (APPs) onde não é possível minerar. Há o caso, ainda, de áreas que não estão enquadradas como protegidas, mas que podem vir a ser, portanto o requerimento de uma área livre deve ser cuidadosamente analisado, por meio de estudo ambiental, para que não seja comprometido o sistema de Outorga por Prioridade.

5.3.4 A relação entre o superficiário e minerador

O fundamento legal da relação entre superficiário e minerador, quando são entes distintos, está estabelecido no artigo 27 do Código de Mineração (BRASIL, 1967). A indenização que deve ser paga ao proprietário da área deve ser equivalente ao dano ou impacto causado, para que os direitos de propriedade e o de exploração dos recursos minerais possam coexistir no mesmo ambiente. O minerador tem autorização para intervenção na área, não podendo se utilizar dela para nenhum outro fim, além dos trabalhos imprescindíveis para conclusão da pesquisa mineral, pagando, assim, o devido valor pelo seu uso ao proprietário (BEZERRA, 2013).

Existem casos em que não há o cumprimento das obrigações contratuais por uma das partes (superficiário ou minerador), resultando em prejuízos e ações na justiça. Um exemplo é o caso de um Agravo em Recurso Especial, Nº 1.205.612 - SC (2017/0288229-5) (BRASIL, 2017a):

“PROCESSUAL CIVIL. AGRAVO EM RECURSO ESPECIAL. AÇÃO DE PRESTAÇÃO DE CONTAS. INÉPCIA. EMBARGOS DE DECLARAÇÃO. OMISSÃO, CONTRADIÇÃO OU OBSCURIDADE. NÃO OCORRÊNCIA. VIOLAÇÃO DO ART. 489, II, DO CPC/15 (ART. 458, II, DO CPC/73). INOCORRÊNCIA. PREQUESTIONAMENTO. AUSÊNCIA. SÚMULA 211/STJ. FUNDAMENTO DO ACÓRDÃO NÃO IMPUGNADO. SÚMULA 283/STF. REEXAME DE FATOS. INTERPRETAÇÃO DE CLÁUSULAS CONTRATUAIS. INADMISSIBILIDADE.” (BRASIL, 2017a, p.1-2).

O STJ julgou procedente o pedido para determinar que a mineradora prestasse contas e pagasse o arrendamento devido ao superficiário, pois o mesmo tem o direito na participação do resultado da lavra uma vez que teria demonstrado a condição de proprietário/superficiário. Outro caso foi de um Embargo de Declaração (EDcl) no Agravo em Recurso Especial, Nº 1.124.158 - MG (2017/0150730-8) (BRASIL, 2018d), julgado pelo STJ, em 2018:

“EMBARGOS DE DECLARAÇÃO NO AGRAVO EM RECURSO ESPECIAL. PROCESSUAL CIVIL. RECURSO MANEJADO SOB A ÉGIDE DO NCPC. ART. 1.022 DO NCPC. OMISSÃO, OBSCURIDADE, CONTRADIÇÃO OU ERRO MATERIAL. INEXISTÊNCIA. PRETENSÃO DE REJULGAMENTO DA CAUSA. IMPOSSIBILIDADE. DECISÃO MANTIDA. EMBARGOS REJEITADOS COM APLICAÇÃO DE MULTA” (BRASIL, 2018d, p.1)

Nesse caso, uma empresa requereu e obteve a concessão de lavra para explorar uma área pertencente à outra mineradora, mas não cumpriu a obrigação assumida de arrendar à essa mineradora o referido direito de lavra. A empresa foi multada e compelida a cumprir as obrigações contratuais firmadas pelas partes. Assim, a legislação prevê que o superficiário não será prejudicado em função das ações do minerador.

Em ambos os casos, a preocupação era com a propriedade da terra e os direitos de exploração. Porém, para alcançar a sustentabilidade na atividade de mineração, as preocupações devem ir além dos direitos de exploração. Deve-se atentar para os impactos que a mineração irá causar na área e como mitigá-los. O superficiário e o minerador devem ser capazes de reabilitar o meio ambiente devastado ou evitar a exploração excessiva como parte de sua responsabilidade social. Portanto, a lei falha em considerar apenas a questão da propriedade no que diz respeito aos direitos de exploração. A redação da lei também deve abordar a capacidade do superficiário, ou do minerador, de desenvolver a atividade de forma sustentável.

5.3.5 A Avaliação de Danos e Renda

Além da indenização pelos danos causados ao imóvel, o superficiário faz jus à renda que deixar de auferir em virtude das pesquisas. Para isso, existe um processo judicial de Avaliação de Dano e Renda, o qual é um procedimento de jurisdição voluntária⁹. Assim, para evitar qualquer prejuízo ou danos em função da pesquisa mineral, é necessário elaborar o Plano de Aproveitamento Econômico (PAE), que contém o cronograma de lavra e as informações sobre o fluxo de caixa esperado para a operação (ATAIDE, 2017).

O requerimento da portaria de lavra e os processos envolvidos na autorização da exploração de minérios são norteados pelo PAE. O minerador deve respeitar as diretrizes estabelecidas no PAE, assim como emitir anualmente o Relatório Anual de Lavra (RAL) para que seja feito o acompanhamento e controle sobre a exploração, de modo que haja compensação ambiental na área explorada (BRASIL, 2001).

A lavra deve ser iniciada em até seis meses da aprovação do PAE e vai até a exaustão dos recursos minerais, desde que o titular obedeça a todos os requisitos legais para a exploração. A portaria de lavra tem valor econômico e pode ser renunciada, vendida ou arrendada de acordo com o interesse do titular. No entanto, esses procedimentos exigem a anuência do órgão responsável para que produzam efeitos (BRASIL, 2018a). Mais uma vez, a lei se preocupa com o prejuízo econômico sofrido pelo proprietário. Não há menção a danos ambientais, que devem ser considerados para que a área retorne à sociedade em condições de uso, após a exploração.

⁹ A jurisdição voluntária é atribuição de ato judicial e não jurisdicional, efetivada pelo complexo de atos praticados pelo juiz, exercendo o poder e cumprindo a função que a lei lhe compete (ARAGÃO, 2009).

5.3.6 O princípio da rigidez locacional

Uma das particularidades da mineração é a impossibilidade de escolher o local a ser minerado em função da ocorrência do mineral no ambiente. Assim, para resolver o conflito entre a mineração e as outras atividades de interesse público, como o agronegócio (GAVIRIA, 2015), é aplicado o princípio da rigidez locacional que prevê a preferência da mineração em detrimento de outras atividades industriais, em função da disponibilidade do mineral na natureza (BRASIL, 1967).

Mas esse princípio considera os impactos causados pela mineração ou pelo agronegócio? A lei pondera apenas a disponibilidade do mineral no meio ambiente, desconsiderando outros fatores como impactos ambientais, populações tradicionais ou indígenas que vivem na área, entre outros fatores que devem ser considerados na decisão sobre a mineração em determinada área com minérios disponíveis.

Em outras partes do mundo, esse princípio pode ser aplicado de forma diferente. Nos EUA, no estado de Michigan, o uso da terra nas operações de mineração não é preferível, sendo a decisão sobre essa questão uma função exclusivamente legislativa, podendo ser tomada pelo governo municipal da área afetada (MALONE, 2010). Nada impede que, no Brasil, no futuro, isto não venha a ser aplicado. Apesar da rigidez locacional, pode um município invocar o interesse local em não ter a atividade de mineral, pois prejudicaria outra atividade econômica da região, por exemplo, turismo, pesca etc.

Normalmente, a presença da atividade minerária leva os povoados a se formarem em torno das indústrias em função da disponibilidade de empregos e perspectivas de melhoria na infraestrutura da região (CARNEY; GUSHULAK, 2016), ocasionando uma redistribuição da população em regiões minerárias (COUTTENIER; SANGNIER, 2015). De fato, as mineradoras promovem melhorias como, por exemplo, a pavimentação da estrada de acesso aos povoados (MONTEIRO; SILVA, 2018).

No entanto, quando a atividade minerária deixa de ser economicamente viável, incorrendo no fechamento da mina, há um risco real de ficar um passivo ambiental que a sociedade precisará arcar. Assim, existe a possibilidade da área se tornar ainda mais pobre do que antes da exploração ser iniciada. Em Bogotá, um estudo demonstrou que o passivo ambiental deixado por áreas de mineração provoca alterações nos aspectos físicos e bióticos da região causando mudanças no ecossistema e na geomorfologia do local (UBAQUE; VACA; RODRÍGUES, 2014). Isso reflete na qualidade de vida da população diretamente afetada por essas transformações.

5.3.7 O princípio da responsabilidade intergeracional

Na região Nordeste do Brasil, destaca-se o impacto relacionado às minas abandonadas, em função, não apenas do esgotamento dos recursos, mas da falta de capital para continuar investindo na exploração. A principal consequência dessa situação são os resíduos tóxicos expostos no meio ambiente. No estado do Piauí, há, ainda, a ocorrência de minas clandestinas, decorrentes da deficiência na fiscalização, resultando, também, no acúmulo de rejeitos provenientes da extração ilegal, causando vários impactos socioambientais (SOUZA et.al., 2014).

Portanto, é importante avaliar o tempo de vida da mina, ou seja, o tempo que ela estará ativa para encontrar soluções de emprego e condições dignas de subsistência para as populações que vêm para essas regiões atraídas pela atividade. O governo precisa criar políticas públicas para realocar essas pessoas que, possivelmente, perderão o emprego e a fonte de renda com o fim da exploração.

Nesse contexto, está envolvido o princípio da responsabilidade intergeracional, que pressupõe a obrigação de conservar o ambiente para a atual e futuras gerações (BRASIL, 2011). Para garantir o cumprimento desse princípio há o licenciamento ambiental e mineral, que tem por finalidade regulamentar a atividade, avaliar o benefício econômico e social para a região afetada, implementação das medidas mitigadoras e de compensação ambiental, pois as licenças são emitidas, somente, mediante o estudo prévio da região e da viabilidade de implementação do empreendimento (BRASIL, 1997).

5.3.8 O licenciamento ambiental

A Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelece o processo de licenciamento ambiental como um instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente, necessário para atividades com potencial risco de degradação ao meio ambiente, como é o caso da mineração (BRASIL, 1981). Caracteriza-se por ser um procedimento composto de três atos administrativos: licença prévia, licença de instalação e licença de operação. A licença ambiental pode ser emitida por órgão ambiental municipal, estadual ou federal, dependendo de alguns fatores como, por exemplo, o porte do empreendimento e localização do mesmo. O conflito de competências dos entes federados para a atividade de licenciamento ficou definida na lei complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011).

Além da licença ambiental, para a atividade de mineração, é exigida a licença mineral, composta pelas seguintes fases: 1) Concessão, na qual é feita a pesquisa para o início da exploração mineral; 2) Licenciamento, quando é concedido o requerimento e registro de licença; e 3) Permissão, na qual é emitida a permissão de lavra garimpeira para o início da exploração. Os órgãos ambientais responsáveis pela emissão de licenças (ambiental e mineral) devem efetuar fiscalizações periódicas a fim de acompanhar a evolução da exploração e garantir que esteja dentro dos parâmetros estabelecidos no processo de licenciamento (BRASIL, 1997).

Em termos de sustentabilidade e proteção ambiental, a etapa essencial da lei minerária é a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). A criação da *National Environmental Policy of Act* (NEPA), nos Estados Unidos, estabeleceu as primeiras diretrizes da AIA, que ganhou força jurídica e institucional em outras partes do mundo e pode ser adaptado a diferentes contextos e circunstâncias. Os métodos de AIA auxiliam na análise da eficácia dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA), avaliando a qualidade do estudo e as informações necessárias para a viabilidade do projeto (MONTEIRO; SILVA, 2018). No entanto, questiona-se se esses instrumentos de controle ambiental são úteis na contenção dos danos ambientais causados pela mineração.

Os processos de licenciamento ambiental e mineral são feitos mediante a apresentação do estudo ambiental da região afetada. Nesses estudos são feitos levantamentos dos impactos ambientais, bem como das contribuições sociais da atividade (RODRIGUES, 2010). Dentre as funções sociais da atividade estão a geração de empregos, o incremento dos cofres públicos através da arrecadação de impostos, o provimento de recursos para cadeias produtivas, melhoria na infraestrutura local, com a construção de estradas, obras de saneamento básico, entre outros (MONTEIRO; SILVA, 2018; TAKANO; FLORES; LIMA, 2016).

Assim, é possível conciliar mineração e desenvolvimento sustentável, por meio de práticas compensatórias? O relatório do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) afirma que as medidas compensatórias são uma das alternativas para promover o mínimo de agressão à natureza e atitudes ambiental e socialmente responsáveis, como a reposição de vegetação em local degradado próximo ao empreendimento, quando não é possível recuperar o local onde está ocorrendo a exploração [BRASIL, 2001].

No entanto, essas formas de práticas compensatórias podem ignorar o fato de que o dano pode ser irreversível e pode causar degradação cumulativa (social ou ambiental). A substituição da vegetação em áreas próximas, ou compensações de biodiversidade e habitat, é uma prática imperfeita. É possível restaurar algumas funções dos serviços ecossistêmicos, mas ainda haverá perdas cumulativas e permanentes na diversidade genética.

Alguns aspectos da biodiversidade não podem ser restaurados, portanto, haverá invariavelmente uma perda de ativos de biodiversidade potenciais para as gerações futuras. Mesmo com a compensação social, por exemplo, a compensação monetária pela aquisição compulsória de terras, isso ainda causa deslocamento social, apesar dos benefícios monetários para os destinatários. Portanto, a eficácia dos processos de compensação pode ser altamente variável e a forma de compensação pode gerar novos impactos. Assim, determinar a equivalência da compensação apresenta muitos desafios teóricos e conceituais.

Além disso, o processo de licenciamento, mesmo que não executado de forma adequada, deve prever e prevenir acidentes ambientais, como o ocorrido no rompimento da barragem de rejeitos de Mariana, Minas Gerais, Brasil [BRASIL; PIRES, 2017]. No caso deste acidente, o licenciamento e o processo regulatório falharam. Para isso, também é importante a realização de fiscalizações periódicas do órgão ambiental. Um processo de licenciamento deve, no mínimo, ser rigoroso o suficiente para que, mesmo quando executado de forma incorreta, ainda proteja o ambiente e as vidas locais.

5.3.9 A obrigatoriedade da recuperação ambiental

A justiça brasileira tem feito valer o cumprimento dessa obrigação em casos de acidentes ambientais, mesmo que, muitas vezes, os processos demorem anos para serem finalizados. Em 2014, o STJ julgou um Recurso Especial Nº 1.374.284 - MG (2012/0108265-7) (BRASIL, 2014), no qual uma mineradora recorreu da pena de pagamento de indenizações e recuperação ambiental pelos danos decorrentes do rompimento da barragem de rejeitos, que aconteceu em 2007, em que vazaram dois bilhões de litros de resíduo de lama tóxica, espalhando-se pelos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, deixando várias famílias desabrigadas:

“RESPONSABILIDADE CIVIL POR DANO AMBIENTAL. RECURSO ESPECIAL REPRESENTATIVO DE CONTROVÉRSIA. ART. 543-C DO CPC. DANOS DECORRENTES DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM. ACIDENTE AMBIENTAL OCORRIDO, EM JANEIRO DE 2007, NOS MUNICÍPIOS DE MIRAÍ E MURIAÉ, ESTADO DE MINAS GERAIS. TEORIA DO RISCO INTEGRAL. NEXO DE CAUSALIDADE” (BRASIL, 2014, p.1).

O STJ negou provimento ao recurso, afirmando que é descabida a invocação, pela empresa responsável pelo dano ambiental, de excludentes de responsabilidade civil para afastar sua obrigação de indenizar, uma vez que “a responsabilidade pelo dano ambiental é objetiva,

informada pela teoria do risco integral, sendo o nexu de causalidade o fator aglutinante que permite que o risco se integre na unidade do ato” (BRASIL, 2014, p.1).

No entanto, constata-se o descumprimento em relação à obrigação de recuperação ambiental na rotina diária das mineradoras. Em um estudo realizado em mineradoras de Minas Gerais foi constatado que muitos empreendimentos descumprem as exigências do licenciamento e das normas ambientais, operando sem a preocupação de preservar remanescentes de vegetação nativa ou recuperar áreas degradadas (VIANA; BURSZTYN, 2010). Outro estudo em indústrias de brita, localizadas na região Nordeste do Brasil, mostrou que as áreas não são recuperadas enquanto exploradas e não há preocupação em recuperar áreas próximas aos empreendimentos. Além disso, não há fiscalizações periódicas por parte do órgão ambiental responsável (MONTEIRO; SILVA, 2018).

No estado de São Paulo, foi constatado que as mineradoras não estavam implementando as ações mitigatórias previstas nos estudos ambientais, comprometendo a recuperação das áreas degradadas (MECHI; SANCHES, 2010). Assim, a elaboração de um bom estudo ambiental é condição necessária, mas não suficiente, para garantir que as medidas mitigadoras sejam cumpridas, pelas indústrias. Algumas medidas mitigadoras ficam listadas apenas como proposta, deixando de ser efetivamente implementadas.

Dessa forma, nota-se a falha na aplicabilidade da legislação mineral brasileira no que diz respeito à recuperação de áreas degradadas. Goh e Effendi (2017) apontam a importância da revisão contínua da política nacional mineral, a fim de que as medidas de sustentabilidade ambiental/social, como a recuperação das áreas degradadas, tenham êxito em sua aplicação. Baumbach, Prado Filho e Fonseca (2013) constataram que mineradoras lidam com desafios ambientais de maneira, predominantemente, reativa, ao invés de se anteciparem, prevendo os problemas e buscando soluções de mitigação eficazes. As empresas, ao optarem por recuperação ambiental insuficiente praticam o enriquecimento sem causa, pois os custos de uma recuperação ambiental adequada já estavam previstos.

Outras partes do mundo enfrentam situações semelhantes. Em Papua Nova Guiné, a exploração da riqueza mineral não é traduzida em desenvolvimento para o país, como constatado pelos indicadores sociais de desempenho. A receita da exploração de recursos naturais não reflete em melhorias na prestação de serviços essenciais para a população, como infraestrutura e emprego, bem como na recuperação das áreas degradadas, ficando o retorno econômico, apenas, nas mãos dos proprietários das mineradoras (POLUME-KIELE, 2014).

Também há casos de corrupção (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017) por agentes ambientais que aceitam propina para não aplicação de multas devidas por exploração não

compatível com o disposto na licença ambiental, o que compromete gravemente a sustentabilidade da atividade, causando danos ao meio ambiente e à sociedade, conseqüentemente.

Um dos entraves, no Brasil, para o cumprimento da obrigação em relação à recuperação ambiental é o preço artificialmente baixo dos produtos para o mercado interno de alguns insumos minerais, pois o custo de recuperação ambiental é tratado, na prática, como externalidade negativa (“*dumping*” ambiental), reduzindo o preço do produto, mas mantendo a lucratividade do negócio pelo volume de venda. Isto é comum para alguns agregados da construção civil (MONTEIRO; SILVA, 2018).

Esse dado é relevante uma vez que a área deve ser devolvida à sociedade em condições para que possa ser aproveitada e isso envolve custos com a sua recuperação, que precisam ser contabilizados para que a falta de recursos econômicos não seja um empecilho no momento de recuperar o ambiente degradado. Situações semelhantes acontecem, também, em outros países, tais como: Espanha, Irlanda, Estados Unidos, Canadá (JOSA; JORBA; VALLEJO, 2012; LIMA et al., 2016). Além disso, a falta de celeridade no julgamento dos processos pode incentivar as mineradoras a atuarem sem a devida preocupação com os riscos ambientais.

5.3.10 A servidão minerária

Outra particularidade da mineração é que as áreas necessárias à instalação dos empreendimentos minerários podem, e devem, ser objeto de servidão minerária, que é vinculada à portaria de lavra. A servidão pode atingir imóveis e direitos minerários, inclusive fora da poligonal titulada, isto é, não somente o local exato da jazida estará sujeito à servidão mineral, mas, também, as vias de transporte, oficinas, habitações, entre outros empreendimentos, podendo ser amigável ou judicial. Nas poligonais da jazida, o próprio título minerário é suficiente para fins de servidão minerária. Nas estruturas acessórias da mina, a servidão dependerá de delimitação pela ANM, após análise do requerimento do minerador e havendo algum prejuízo, a parte prejudicada faz jus à indenização. (BRASIL, 2011).

Em 2013, o STJ negou provimento sobre um AgRg no Recurso Especial, Nº 1.369.723 - MG (2013/0048546-5) (BRASIL, 2013b), em que a mineradora havia sido contemplada com a imissão na posse da servidão mediante o depósito em juízo do valor integral da avaliação, isto é, o proprietário da área foi indenizado pela servidão e, portanto, não tinha direito a requerer nova análise sobre o julgamento, uma vez que não foi configurado um fato novo:

“AGRAVO REGIMENTAL NO RECURSO ESPECIAL. AÇÃO DE INSTITUIÇÃO DE SERVIDÃO ADMINISTRATIVA MINERÁRIA. IMISSÃO NA POSSE. OFENSA AOS ARTS. 458 E 535 DO CPC. VIOLAÇÃO AO CONTRADITÓRIO. FATO NOVO. SUPRESSÃO DE INSTÂNCIA. SÚMULAS 282, 283, 356/STF, 7, 211/STJ. IMPROVIMENTO.” (BRASIL, 2013b, p.1).

As servidões minerais são áreas constituídas como essenciais ao desenvolvimento de um empreendimento mineral e a aplicabilidade das mesmas é regida pelo Código de Mineração. Em todas as fases de um empreendimento minerário e para finalidades distintas, o uso das áreas adjacentes às minas pode contribuir com o objetivo social da indústria, no sentido de gerar condições para o desenvolvimento sustentável regional (FERNANDES; HOLLANDA, 2009).

Muitos benefícios podem advir do envolvimento da sociedade, através da servidão. Além das empresas existentes no local, outras tendem a se instalar atraídas pela movimentação do comércio. O problema dessa situação é que, muitas vezes, é feito um alto investimento para a instalação desses empreendimentos sem considerar que a atuação de uma mineradora tem um tempo determinado, em função do esgotamento dos recursos minerais. Anteriormente à cessação da exploração e o fechamento da mina, é preciso buscar uma alternativa para esses estabelecimentos que irão perder seu principal público alvo.

Situações como essa podem desencadear processos de falência, uma vez que não há mais o consumidor para determinados produtos específicos, gerando problemas sociais que não existiam antes da operação das minas. Além disso, há o passivo ambiental deixado por essas indústrias que, muitas vezes, não fazem a recuperação do ambiente degradado (UBAQUE; VACA; RODRÍGUES, 2014). Para minimizar essas situações é preciso envolvimento de todos os atores (indústria, governo e sociedade) no intuito de fazer valer o cumprimento das medidas legais relativas aos cuidados após o encerramento da exploração. Isso significa que políticas públicas devem ser criadas para solucionar os problemas sociais decorrentes do fechamento das minas.

No Chile, o modelo de governança em que o Estado promove os interesses privados, tem gerado desenvolvimento econômico desigual e degradação ambiental, em relação à atividade de mineração. A capacidade regulatória diminuída e a falta de monitoramento da prática ambiental trazem consequências sociais e ambientais de degradação, muitas vezes, irreversíveis (SINGH, 2010).

Os principais atos jurídicos que regulam a política mineral em 21 países da União Europeia prescrevem a conservação do patrimônio geológico como um recurso econômico, ou seja, a promoção do seu uso racional. O diálogo entre as várias partes interessadas, incluindo

representantes da indústria, governo e sociedade permite que as necessidades de conservação das áreas de mineração sejam equilibradas (TIESS; RUBAN, 2013).

5.3.11 A audiência pública como instrumento de promoção da sustentabilidade

Uma das formas de fazer com que o envolvimento da sociedade resulte na exequibilidade de soluções para o passivo ambiental e social é através de audiências públicas. A lei brasileira exige que empreendimentos extrativistas tenham seu pedido de licenciamento comunicado para a sociedade, através de mídias locais, como os jornais, para que possam ser requeridas as audiências públicas, a qual é promovida pelo órgão ambiental ou pode ser solicitada por entidade civil, pelo Ministério Público, ou por cinquenta ou mais cidadãos (BRASIL, 1997).

Esse instrumento garante à sociedade a prestação de esclarecimentos em relação aos empreendimentos e a possibilidade de discussão de soluções para a região após o fechamento da mina. No Peru, o envolvimento, através das audiências públicas é tão significativo, que levou o governo a rever os projetos de mineração, resultando na suspensão ou cancelamento, em alguns casos (JASKOSKI, 2014). Em mineradoras de brita, localizadas no Nordeste do Brasil, ao contrário, há constatação de que não são feitos pedidos de audiências públicas, comprometendo o envolvimento das comunidades no processo de licenciamento e instalação das mesmas (MONTEIRO; SILVA, 2018).

As pessoas precisam saber seu direito de participar de audiências públicas e isso é feito por meio de meios de comunicação, jornais, televisão etc. O acesso à informação possibilita a participação popular e o envolvimento da sociedade, com transparência. Isso ajuda a promover a sustentabilidade do setor.

A falta de esclarecimentos em relação à atividade pode gerar uma série de conflitos locais (ZHOURI; OLIVIERA, 2012). Um estudo realizado no Equador, sobre os conflitos associados às operações de mineração demonstrou que a população teme o possível impacto social e ambiental, à longo prazo. Portanto, é preciso estar atento à percepção das pessoas, uma vez que os problemas ambientais podem levar a diferentes formas de conflito de acordo com o contexto econômico e sociocultural do local afetado (VÁZQUEZ; ESPINOSA; EGUIGUREN, 2016). É preciso informar a população sobre os riscos e benefícios da atividade e a audiência pública, nesse caso, torna-se o elo entre o minerador e a comunidade.

A desinformação pode gerar, também, outros tipos de problemas, como denúncias indevidas por parte da sociedade. Em um Recurso Especial Nº 1.479.063 - RS (2014/0223436-

1) (BRASIL, 2017b), julgado pelo STJ, em 2017, foi deferido o pedido de indenização de uma empresa que sofreu denúncia insincera, sendo acusada de prática de lavra clandestina:

“CIVIL. DIREITO MINERÁRIO. AÇÃO DE REPARAÇÃO DE DANOS C/C OBRIGAÇÃO DE FAZER ART. 466-A DO CÓDIGO DE PROCESSO CIVIL. DENÚNCIA INVERÍDICA DE LAVRA CLANDESTINA. ATO ILÍCITO CONFIGURADO. PARALISAÇÃO DE EXTRAÇÃO MINERADORA. LUCROS CESSANTES. MATÉRIA DE FATO. REEXAME. INADMISSIBILIDADE. SÚMULA 7/STJ. RECURSO CONHECIDO E NÃO PROVIDO.” (BRASIL, 2017b, p.1).

O fato se tornou público incorrendo na paralisação das atividades e cessação dos lucros, em função da instauração de processo administrativo junto ao DNPM. Como consequência, a credibilidade da indústria, perante seus clientes, ficou abalada, configurando o direito à indenização por danos morais (BRASIL, 2017b). Assim, o esclarecimento para a população, sobre o funcionamento da atividade, pode evitar situações que podem incorrer em prejuízos que não haveria se existisse informação adequada.

5.3.12 A educação como instrumento de promoção da sustentabilidade

Uma das formas de disseminar a sustentabilidade na mineração em todas as suas dimensões (social, econômica e ambiental) é por meio da educação. Essa é, também, uma maneira potencial de promover a aplicabilidade do Direito Minerário de forma eficaz. A educação ambiental em todos os níveis de ensino, inclusive a educação da comunidade, é um dos princípios da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) (BRASIL, 1981), que pode contribuir com a adoção de práticas sustentáveis na atividade de mineração.

De acordo com Voulvoulis et al (2013), a compreensão dos processos que governam os recursos naturais é limitada pois as disciplinas científicas usam diferentes conceitos e linguagens para descrever e explicar sistemas ecológicos complexos. Assim, a sustentabilidade na mineração pressupõe uma abordagem mais integrada e interdisciplinar que considere as relações entre recursos, pessoas e meio ambiente. O foco em sistemas mais amplos pode contribuir para o desenvolvimento de soluções mais efetivas para o gerenciamento de problemas ambientais econômicos e sociais associados à mineração.

Dessa forma, a efetividade da aplicação dos princípios do Direito Minerário depende da integração entre indústria, governo e sociedade, principalmente, no que diz respeito ao conhecimento das obrigações e direitos inerentes ao minerador e da responsabilidade social em desenvolver as atividades dentro dos requisitos estabelecidos pela lei. No Quadro 3 são

mostrados os impactos associados à jurisprudência analisada, juntamente com a análise crítica de cada situação.

Quadro 3 – Análise crítica de cada jurisprudência, bem como os impactos associados a elas

Jurisprudência	Breve descrição	Impactos associados	Análise crítica
Agravo Regimental no Recurso Especial, Nº 1.394.171 - RS (2013/0266001-0)	Exploração mineral sem autorização legal emitida pelo DNPM	Degradação ambiental; uso indevido dos recursos; enriquecimento ilícito;	A autorização não é mera burocracia. É proteção para o minerador e para a sociedade. Atividade ilegal e sem fiscalização é um prejuízo para a sociedade, para natureza e para o estado.
Mandado de Segurança, Nº 6768/DF (2000/0002376-0)	Pesquisa mineral não iniciada dentro do prazo estabelecido no Código de Mineração (três anos)	Conflitos com a população; frustração da expectativa de emprego e renda; desmatamento antecipado/desnecessário	O empreendimento mineral é complexo e exige planejamento. Não é mera posição econômica que se estabelece. Faz parte do compromisso socioambiental da empresa
Agravo Regimental no Recurso Especial, Nº 1.369.723 - MG (2013/0048546-5)	Compensação por servidão minerária	Viabilização da atividade minerária; intervenção em propriedades de terceiros; descontentamento da população; enriquecimento do superficiário por meio de indenizações; degradação ambiental	A legislação visa a exploração racional do recurso, a equalização de interesses e proteção do ambiente e da sociedade.
Embargos de Declaração no Agravo em Recurso Especial, Nº 1.124.158 - MG (2017/0150730-8) Agravo em Recurso Especial, Nº 1.205.612 - SC (2017/0288229-5)	Descumprimento das obrigações entre o minerador e o dono da terra	Degradação ambiental; conflitos entre o minerador e o dono da terra; perdas econômicas decorrentes desses conflitos; insatisfação para ambas as partes	A paz social é uma das finalidades do direito. A mediação e arbitragem de conflitos evita a judicialização de questões que trazem prejuízos para minerador, dono da terra e, principalmente, para sociedade.
Recurso Especial Nº 1.374.284 - MG (2012/0108265-7)	Falta de recuperação de áreas degradadas e acidentes ambientais	Degradação ambiental; impossibilidade de recuperação da área após acidentes ambientais; letalidade dos ecossistemas; perda de vidas humanas; pobreza; desajuste social; perdas materiais graves	Não basta existir uma legislação ambiental vigorosa. É necessário que o poder executivo seja ágil no cumprimento da mesma para que não se judicialize o descumprimento de normas básicas de boa gestão na mineração
Agravo Regimental no Recurso Especial Nº 1.479.063 - RS (2014/0223436-1)	Denúncias infundadas sobre minas clandestinas	Conflitos com a comunidade; prejuízo moral ao minerador; desgaste social	A população desconhece os caminhos legais para a exploração minerária e suas várias etapas.

Fonte: Autores

A legislação brasileira não é perfeita. Mas tem leis que protegem o minerador, para que ele faça a exploração a fim de obter o lucro esperado; proteger a sociedade, ao estabelecer os deveres e obrigações sociais da empresa; e proteger o meio ambiente porque determina os limites quanto à exploração dos recursos, bem como as obrigações quanto à recuperação da área explorada. Além disso, o Judiciário demora a julgar os processos que se arrastam, muitas vezes, por anos, prejudicando a resolução de problemas ambientais e sociais, impactando, também, economicamente no desenvolvimento da atividade.

Existem várias oportunidades para aprimorar a legislação brasileira que deve ser eficiente para atingir seu objetivo, ao mesmo tempo em que viabiliza os sistemas regulatórios e as decisões judiciais a ela associadas de maneira eficiente, equitativa, transparente e eficaz. Se os processos de tomada de decisão e as respostas por meio do Judiciário demorarem muito para resolver os problemas, a legislação e os sistemas regulatórios devem facilitar a gestão de riscos de forma mais proativa e a realização de oportunidades de negócios de maneira segura e equitativa.

Outro problema é que os órgãos ambientais não são eficientes na realização de fiscalizações e promoção de audiências públicas, comprometendo a aplicabilidade das regras estabelecidas pela lei. Portanto, entende-se que o problema no Brasil não é apenas a redação da lei, mas, também, sua aplicabilidade, o que acaba desencadeando processos de exploração mineral fora dos parâmetros, gerando insustentabilidade econômica, social e ambiental, em muitos casos.

A aplicabilidade da lei não significa simplesmente a capacidade de se fazer cumprir a lei, que é parcialmente ditada pela redação da lei, independentemente de corrupção ou incompetência nas agências de aplicação. A aplicabilidade vai além do cumprimento da lei e depende do envolvimento da sociedade e das indústrias, cumprindo seu papel obedecendo a legislação e o governo cumprindo seu papel regulador e fiscalizador.

5.4 Conclusão

A mineração é uma atividade econômica com forte limitação locacional pois depende, da disponibilidade do mineral na natureza. É de utilidade pública e interesse nacional e, portanto, no Brasil, sua instalação é preferida em detrimento de outras atividades, em função da rigidez locacional. A dependência da sociedade moderna sobre o bem mineral torna a mineração essencial, uma vez que a atividade fornece insumos para diversas cadeias produtivas.

A Constituição Federal de 1988 é a base do estudo de Direito Minerário brasileiro, seguida pelo Código de Mineração e os Atos Normativos do DNPM, do MMA e do MME. Dentre os diversos pontos, destaca-se a titularidade sobre o bem mineral, que compete à da União e a importância estratégica dos minerais para o desenvolvimento econômico e social, atrelada à proteção ambiental.

Há situações nas quais o Direito Minerário não é eficazmente aplicado, como na recuperação das áreas degradadas, comprometendo a efetividade do princípio intergeracional. Essa falha fica evidente na forma como a sociedade precisa lidar com o passivo ambiental e social que não existia antes da instalação do empreendimento e nos casos julgados pelo STJ como, por exemplo, do rompimento da barragem de rejeitos, que provocou danos ambientais, no estado de Minas Gerais, em 2007.

As leis, normas e regulamentos, se aplicados corretamente, protegem o minerador, a sociedade e o meio ambiente. Embora a legislação brasileira abranja todos esses aspectos e possua mecanismos para que as atividades de mineração sejam realizadas dentro de parâmetros que garantam a sustentabilidade do empreendimento, o melhor uso dos recursos e a proteção ambiental, ela não é perfeita e possui muitas lacunas que poderiam ser melhoradas. Nem todos os problemas vêm da parte regulatória e judicial do sistema, porém, a não aplicação das leis, a falta de envolvimento da sociedade e de fiscalização dos órgãos ambientais, além da falha na agilidade no julgamento de processos, comprometem o desenvolvimento da mineração em todo o seu potencial para ser uma atividade ambiental, social e econômica sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos projetos de pesquisa [401320/2016-2] e [422087/2018-1] e o pesquisador José Machado Moita Neto agradece ao CNPq pelo financiamento através da Bolsa de Produtividade em Pesquisa [307215/2015-6].

Referências

ARAGÃO, V. C. Jurisdição Voluntária. **Âmbito Jurídico**, v. 12, n. 64, p. 1-4, 2009.

ATAÍDE, P. **Direito Minerário**. 1ª ed. Salvador: Editora Jus Podivm. 2017, 272 p.

BAUMBACH, M. de O.; PRADO FILHO, J. F. do; FONSECA, A. Environmental management in small mining enterprises: comparative analysis of three Brazilian cases through the lenses of ISO 14001. **Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 1, p. 111-116, 2013.

BEZERRA, F. A. S. L. A indenização ao superficiário da mina pelo espaço impactado na pesquisa mineral. **Âmbito Jurídico**, v. 16, n. 114, p. 1-5, 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **DNPM – Portal de Outorga**. 2018a. Disponível em: <http://outorga.dnpm.gov.br/SitePages/Explora%C3%A7%C3%A3o%20Mineral.aspx> Acesso em: 29 set. 2020.

BRASIL. **Código de Mineração e legislação correlata**. – 2. ed. – Brasília, DF: Senado Federal: Subsecretaria de Edições Técnicas, 2011. 112 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 9/87**, de 03 de dezembro de 1987. Dispõe sobre a realização de Audiências Públicas no processo de licenciamento ambiental. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=60>>. Acesso em 15 set 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 237**, de 19 de dezembro de 1997. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>>. Acesso em 26 set 2020.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRASIL. **Decreto nº 9.406**, de 12 de junho de 2018. Regulamenta o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, a Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, a Lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, e a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Brasília, 2018b. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2018/decreto-9406-12-junho-2018-786851-publicacaooriginal-155831-pe.html> Acesso em: 20 set. 2020.

BRASIL. **Decreto – Lei nº 227**, de 28 de fevereiro de 1967. Dá nova redação ao Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940 (Código de Minas). Brasília, 1967. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del0227.htm Acesso: em 29 set. 2020.

BRASIL. **Decreto – Lei 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm> Acesso em: 20 set. 2020.

BRASIL. **Lei nº 8.001**, de 13 de março de 1990. Define os percentuais da distribuição da compensação financeira de que trata a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989, e dá outras providências. Brasília, 1990. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8001.HTM Acesso em: 28 set. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **IBAMA - Manual de Normas e Procedimentos para licenciamento ambiental no setor de extração mineral**. Brasília, 2001. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/arquivos/MANUAL_mineracao.pdf>. Acesso: em 18 set. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Marco Regulatório da Mineração**. 2013a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/introducao> Acesso em: 30 set. 2020.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Mandado de Segurança MS 6768 DF** 2000/0002376-0). Relator: Ministro José Delgado. Brasília (DF), 26 de outubro de 2000. 2000. Disponível em: https://ww2.stj.jus.br/processo/revista/documento/mediado/?componente=IMGD&sequencial=265845&num_registro=200000023760&data=20001218&formato=PDF Acesso em: 11 nov. 2020.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Agravo Regimental no Recurso Especial N°** 1.369.723 - MG (2013/0048546-5). Relator: Ministro Sidnei Beneti. Brasília (DF), 14 de maio de 2013. 2013b. Disponível em: https://ww2.stj.jus.br/processo/revista/documento/mediado/?componente=ATC&sequencial=28637619&num_registro=201300485465&data=20130604&tipo=5&formato=PDF Acesso em: 14 nov. 2020.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial N°** 1.374.284 - MG (2012/0108265-7). Relator: Ministro Luis Felipe Salomão. Brasília (DF), 27 de agosto de 2014. 2014. Disponível em: https://ww2.stj.jus.br/processo/revista/documento/mediado/?componente=ATC&sequencial=38502232&num_registro=201201082657&data=20140905&tipo=5&formato=PDF Acesso em: 13 nov. 2020.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Agravo em Recurso Especial N°** 1.205.612 - SC (2017/0288229-5). Relator: Ministra Nancy Andrigui. Brasília (DF), 12 de dezembro de 2017. 2017a. Disponível em: https://ww2.stj.jus.br/processo/revista/documento/mediado/?componente=MON&sequencial=79296927&num_registro=201702882295&data=20180205&tipo=0 Acesso em: 08 nov. 2020.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Agravo Regimental no Recurso Especial N°** 1.479.063 - RS (2014/0223436-1). Relator: Ministra Isabel Gallotti. Brasília (DF), 21 de novembro de 2017b. 2017b. Disponível em: https://ww2.stj.jus.br/processo/revista/documento/mediado/?componente=ATC&sequencial=78633177&num_registro=201402234361&data=20171129&tipo=41&formato=PDF Acesso em: 12 nov. 2020.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Agravo Regimental no Recurso Especial N°** 1.394.171 - RS (2013/0266001-0). Relator: Ministro Felix Ficher. Brasília (DF), 23 de agosto de 2018. 2018c. Disponível em: https://ww2.stj.jus.br/processo/revista/documento/mediado/?componente=ATC&sequencial=86987726&num_registro=201302660010&data=20180831&tipo=5&formato=PDF Acesso em: 09 nov. 2018.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Embargos de Declaração no Agravo em Recurso Especial N°** 1.124.158 - MG (2017/0150730-8). Relator: Ministro Moura Ribeiro (DF), 01 de agosto de 2018. 2018d. Disponível em: https://ww2.stj.jus.br/processo/revista/documento/mediado/?componente=MON&sequencial=85647740&num_registro=201701507308&data=20180806&tipo=0 Acesso em: 12 nov. 2020.

BRASIL, L. M.; PIRES, V. O que a lama nos deixou: reflexões sobre a tragédia de Mariana, a mídia e a mineração no Brasil. **Chroniques des Amériques**, v. 17, n. 3, p.1-10, 2017.

CARNEY, J. G.; GUSHULAK, B. D. A Review of Research on Health Outcomes for Workers, Home and Host Communities of Population Mobility Associated with Extractive Industries. **Journal of Immigrant and Minority Health**, v. 18, n. 3, p. 673–686, 2016.

COUTTENIER, M.; SANGNIER, M. Living in the Garden of Eden: Mineral resources and preferences for redistribution. **Journal of Comparative Economics**, v. 43, p. 243–256, 2015.

FEIGELSON, B. (2018) **Curso de Direito Minerário**. 3ª ed. São Paulo: Saraiva. 368 p.

FERNANDES, A. G.; HOLLANDA, H. As servidões minerais e sua natureza jurídica. **Revista Jurídica Uniaraxá**, v. 13, n. 12, p. 35-52, 2009.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **LOGEION: Filosofia da Informação**, v. 6, p. 57-73, 2020.

GAVIRIA, E. M. A “licença social para operar” na indústria da mineração: uma aproximação a suas apropriações e sentidos. **Revista Brasileira em Estudos Urbanos e Regionais**, v. 17, n. 2, p. 138-154, 2015.

GONÇALVES, R. J. de A. F.; MILANEZ, B.; WANDERLEY, L. J. Neoeextrativismo Liberal-Conservador: a Política Mineral e a Questão Agrária no Governo Temer. **Geografia em Debate**, v.12, n.2, p. 348-395, 2018.

GREENTREE, M.; BUCCI, L.; CHAN, G. Changes in Chinese investment in the international minerals industry, **SRK Consulting**, p. 1–4, 2013.

JASKOSKI, M. Environmental Licensing and Conflict in Peru’s Mining Sector: A Path-Dependent Analysis. **World Development**, v. 64, p. 873–883, 2014.

JOSA, R.; JORBA, M.; VALLEJO, V. R. Opencast mine restoration in a Mediterranean semi-arid environment: Failure of some common practices. **Ecological Engineering**, v. 42, p. 183–191, 2012.

KAI, K.; BUANES, A.; TIMO, K.; MASLOBOEV, V.; PETTERSSON, M. Sustainable mining, local communities and environmental regulation. **Barents Studies: Peoples Economies and Politics**, v. 2, n. 1, p. 50-81, 2015.

LIMA, A. T.; MITCHELL, K.; O’CONNELL, D. W.; VERHOEVEN, J.; VAN CAPPELLEN, P. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. **Environmental Science & Policy**, v. 66, p. 227-233, 2016.

MAGNO, L. Ordenamento territorial da mineração no Brasil e conflitos ambientais. **Geografias**. v. 11, n. 1, p. 84-107, 2015.

MALONE, B. D. Mining no longer a preferred land use in Michigan. **Natural Resources & Environment**, v. 26, n. 1, p. 1-4, 2011.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MONTEIRO, N. B. R.; MOITA NETO, J. M.; SILVA, E. A. da. Bibliometric study of the crushed stone mining sector. **Mineral processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 34, n. 2, p. 235-249, 2018.

MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A. da. Environmental licensing in Brazilian's crushed stone industries. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 71, p. 49-59, 2018.

PASSOS, F. L., COELHO, P., DIAS, A. (Des)territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG. **Cadernos Metrópole**, v. 19, p. 269-297, 2017.

POLUME-KIELE, H. The governance of natural resources: issues affecting better management of revenues and distribution of benefits within Papua New Guinea. **International Journal of Rural Law and Policy**. Special Edition, v. 1, p. 1-7, 2014.

RODRIGUES, G. S. de S. C. A análise interdisciplinar de processos de licenciamento ambiental no estado de Minas Gerais: conflitos entre velhos e novos paradigmas. **Revista Sociedade e Natureza**, v. 22, n. 2, p. 267-282, 2010.

SINGH, J. T. N. Reconstituting the Neostructuralist State: the political economy of continuity and change in Chilean mining policy. **Third World Quarterly**, v. 31, n. 8, p. 1413–1433, 2010.

SOUZA, K. V.; VILLA VERDE, R. B. da R.; ALAMINO, R. de C. J.; FERNANDES, F. R. C. Mineração na Região Nordeste do Brasil: quadro atual e perspectivas. In: FERNANDES, F. R. C.; ALAMINO, R. de C. J.; ARAUJO, E. R. (Org.). **Recursos minerais e comunidades: impactos humanos, socioambientais e econômicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. p. 117-123.

TABATABAEI, J.; MOHAMMADI, F. Environmental Effects of Mining Industries in Meymeh Region, North West of Isfahan. **APCBEE Procedia**, v. 5, p. 388-393, 2013.

TAKANO, C. C.; FLORES, J. C. do C.; LIMA, H. M. de. An Analysis of the Rate for Controlling, Monitoring and Supervision of Exploration and Mining Activities of Mineral Resources (TFRM). **Revista Escola de Minas**, v. 69, n. 1, p. 105-110, 2016.

TIESS, G.; RUBAN, D. A. Geological heritage and mining legislation: a brief conceptual assessment of the principal legal acts of selected EU countries. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 124, p. 411–416, 2013.

UBAQUE, C. A. G.; VACA, M. C. G.; RODRÍGUES, C. F. A. Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. **Tecnura**, v. 18, n. 42, p. 90-102, 2014.

VÁZQUEZ, L. S.; ESPINOSA, M. G.; EGUIGUREN, M. B. Perception of socio-environmental conflicts in mining areas: the case of the Mirador Project in Ecuador. **Ambiente & Sociedade**. v. 19, n. 2, p. 23-44, 2016.

VIANA, M. B.; BURSZTYN, M. A. A. Regularização ambiental nas minerações em Minas Gerais. **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 363-369, 2010.

VOULVOULIS, N.; SKOLOUT J. W. F.; OATES C. J.; PLANT, J. A. From chemical risk assessment to environmental resources management: the challenge for mining. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, p. 7815–7826, 2013.

ZHOURI, A.; OLIVEIRA, R. Development and environmental conflicts in Brazil. Challenges for anthropology and anthropologists. **Vibrant**, v. 9, n. 1, p. 181-208, 2012.

6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL EM INDÚSTRIAS QUE FABRICAM CONCRETO¹⁰

Resumo

O concreto é um material usado na construção civil em diversas obras, o que o faz um dos produtos mais consumidos no mundo. As concreteiras geram impactos ambientais negativos, que precisam ser estudados, a fim de avaliar sua extensão e buscar formas de mitigá-los. Nesse trabalho foi utilizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para medir o impacto da produção do concreto. Foram coletados dados primários (quantidade de cimento, brita, areia, energia, água, aditivos) em três indústrias concreteiras localizadas em Teresina, Piauí, Brasil, e utilizadas informações da base de dados Ecoinvent 3.7.1 (transporte, resíduos sólidos, efluentes líquidos, material particulado). Para a análise, foram utilizados dois métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), CML (*baseline*) e ReCiPe *Midpoint* (H) a fim de comparar o desempenho do concreto, frente a essas diferentes metodologias, especialmente relativo à abrangência (regional/global) das categorias de impacto dos mesmos. Os resultados dos impactos potenciais para as categorias selecionadas para análise, com base na norma EN 15804 (ES, 2019), foram bastante próximos para os dois métodos adotados. A semelhança entre os resultados indica que ambos são apropriados para estudos de ACV em indústrias brasileiras. Além disso, os valores encontrados na literatura mostram a consistência para o cálculo da ACV, uma vez que foi utilizada uma quantidade expressiva de dados primários brasileiros, gerando informações confiáveis para orientar a tomada de decisão, nesse setor. Para a categoria toxicidade humana, os achados nesse estudo se tornam relevantes para que novos trabalhos possam ter um parâmetro de comparação, uma vez que não foram encontrados trabalhos que abordem a toxicidade humana, na mesma perspectiva desse estudo. Os processos que mais contribuíram para a potencialização dos impactos foram a produção de cimento e a produção de sílica ativa. Além desses, outro processo que contribuiu no impacto do ciclo de vida é a destinação e tratamento dos resíduos. Assim, para essas indústrias é viável adquirir um triturador para reciclagem e reaproveitamento de resíduos sólidos, a fim de diminuir a sua incidência e optar por produtos cimentícios em substituição à sílica ativa e que possam ser utilizados para diminuir o teor de cimento no traço do concreto. Além disso, a escolha de fornecedores se torna uma estratégia relevante para reduzir o impacto nas categorias depleção da camada de ozônio e aquecimento global, uma vez que reduzindo as distâncias percorridas, consequentemente, há diminuição do impacto com emissões gasosas. As considerações apresentadas se referem, apenas, às dimensões do desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Concreto. Ciclo de Vida. Impactos ambientais.

Abstract

*Concrete is a material used in civil construction several works, which makes it one of the most consumed products in the world. Concrete companies generate environmental negative impacts, which need to be studied in order to assess their extension and find ways to mitigate them. In this work, the Life Cycle Assessment (LCA) was used to evaluate the concrete environmentally. Primary data (amount of cement, gravel, sand, energy, water, additives) were collected in three concrete industries located in Teresina, Piauí, Brazil, and data from the Ecoinvent 3.7.1 database (transport, solid waste, liquid effluents, particulate matter) were also used. For the analysis, two methods of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) were used, CML (*baseline*) and ReCiPe *Midpoint* (H) in order to compare the concrete performance, in view of*

¹⁰ Artigo submetido ao periódico *Journal of Cleaner Production* em 11/05/2021. Em 19/07/2021 o *status* do mesmo é "em avaliação"

these different methodologies, especially regarding the coverage (regional/global) of their impact categories. The results of potential impacts for the categories selected for analysis, based on the standard EN 15804 (ES, 2019), were quite close for the two methods, except for the categories human toxicity and freshwater ecotoxicity. The similarity between the results indicates that both are appropriate for studies of LCA in Brazilian industries. In addition, the similarity with the values found in the literature, in studies carried out under conditions similar to this research, shows consistency for the LCA calculation, since an expressive amount of Brazilian primary data was used, generating reliable information to guide decision making in this sector. For the human toxicity category, the findings become relevant so that new studies can have a comparison parameter on the potential impacts of this category on concrete production, since no surveys were found that address human toxicity, in the same perspective of this research. The processes that most contributed to potentialize the impacts were the production of cement and the production of activated silica. In addition to these, another process that contributed to the impact of the concrete life cycle is the destination and treatment of waste. Thus, for these industries it is feasible to acquire a crusher for recycling and reusing solid waste, in order to reduce its incidence and opt for cement products in substitution to activated silica that can be used to decrease the cement content in the concrete mix. In addition, the choice of suppliers becomes a relevant strategy to reduce the impact on the ozone depletion and global warming categories, since reducing the distances, consequently, there is a reduction in the impact with gaseous emissions and particulate material. The presented considerations refer only to the dimensions of sustainable development.

Keywords: Reinforced concrete. Life cycle. Environmental impact.

6.1 Introdução

A produção de concreto abastece o setor da construção civil, sendo um material amplamente utilizado em obras de habitação, saneamento básico e infraestrutura necessárias para a boa qualidade de vida das pessoas. Estima-se que, anualmente, são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, no mundo, aproximadamente, um consumo médio de 1,9 ton/hab por ano, valor inferior apenas ao consumo de água (FEDERACIÓN IBEROAMERICANA DE HORMIGÓN PREMESCLADO - FIHP, 2021). No Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos por ano (INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 2018).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), cujo propósito é estabelecer um plano de ação para as pessoas e para o planeta em prol do desenvolvimento sustentável (ONU, 2020). Dentre os ODS, estão aqueles relacionados à indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9), cidade e comunidades sustentáveis (ODS 11) e consumo e produção sustentáveis (ODS 12) que podem ser alcançados

com a colaboração das indústrias concreteiras, para o cumprimento da agenda 2030. Assim, é preciso que sejam estudados os processos envolvidos na produção do concreto que possibilitem a proposição de cenários com a incorporação de estratégias para uma produção mais sustentável, do ponto de vista ambiental, no setor.

O concreto é o produto da mistura de agregados (areia e brita), água, cimento, com ou sem aditivos. Pode ser misturado na obra (*in loco*), em equipamento estacionário, em usinas de concreto ou em caminhão betoneira (ABNT, 2012). O concreto dosado em central é aquele preparado em empresas concreteiras e transportado até o canteiro de obras por caminhões betoneiras. Além de proporcionar concreto de melhor desempenho, a dosagem adequada dos insumos possibilita seu racionamento, uma vez que há um criterioso controle na sua quantidade e proporciona mais segurança e durabilidade, ao contrário do concreto produzido *in loco*, que tem menor qualidade devido à alta variabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Uma questão importante e que determinará a possibilidade de produção em central ou *in loco* é a aplicação pretendida. O concreto dosado *in loco* é utilizado, normalmente, em obras de pequeno e médio porte, por exemplo, para a confecção de paredes em casas populares do programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), realizado pelo governo federal brasileiro (MAPA DA OBRA, 2013). O concreto dosado em central é destinado à aplicação em grandes obras e seu uso depende de um plano de concretagem para assegurar a sua qualidade antes mesmo do seu lançamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL – ABESC, 2007).

Para garantir o seu controle de qualidade existem, aproximadamente, noventa normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além das normas internacionais *International Organization for Standardization* (ISO) que regulamentam a sua fabricação e utilização. A necessidade de um padrão de qualidade para esse setor se dá, principalmente, por ser um material aplicado à construção de edificações, pontes, túneis, postes etc. que podem sofrer avarias em sua estrutura, devido ao concreto de baixa qualidade, causando acidentes.

A importância de atentar para as normas que regulamentam o setor de produção de concreto consiste, principalmente, no fato de que existem várias manifestações patológicas que acometem esse produto e que podem ser evitadas. Dentre os fatores que influenciam o comportamento final do concreto, pode-se mencionar: qualidade dos materiais constituintes, relação água/cimento; meio ambiente (intempéries) e ações relativas à qualidade no processo de fabricação (MASCIA; SARTORTI, 2011).

A fabricação de concreto causa diversos impactos ambientais, como emissões atmosféricas, geração de material particulado e ruído, supressão da vegetação para a construção

da indústria, produção de resíduos etc. (INGRAO *et al.*, 2014). Além desses, existem os impactos desde a extração da matéria-prima, como areia e brita, até as emissões gasosas do combustível no trajeto da entrega do material ao consumidor final (KIM; TAE, 2016). Todos os impactos devem ser considerados ao se fazer a análise do desempenho ambiental de um produto.

Dentre as ferramentas que auxiliam a avaliação de impactos ambientais para a tomada de decisão em relação à mitigação dos mesmos, tem-se a ACV, utilizada para a avaliação dos impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços, ao longo do seu ciclo de vida. Os impactos são avaliados desde a extração das matérias-primas, transporte, passando pela produção, uso e disposição final (ABNT, 2014).

De acordo com as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014a), a análise é feita mediante um inventário de entradas e saídas do sistema do produto; a avaliação dos impactos relacionados a essas entradas e saídas; e, por fim, é feita a interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e da avaliação dos impactos em função dos objetivos do estudo. A ACV útil para a identificação dos potenciais impactos ambientais da produção de concreto (INGRAO *et al.*, 2014; KIM; TAE, 2016), podendo auxiliar a tomada de decisões, de forma a indicar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental desse material.

Para o setor da construção civil, existem, ainda, duas normas europeias para orientar a aplicação da ACV. A EN 15978:2011 especifica o método de cálculo para avaliar o desempenho ambiental de um edifício e fornece os meios para comunicar o resultado da ACV (BS, 2011). A EN 15804:2019 fornece regras de categoria básicas para produtos e serviços de construção, além de uma estrutura para garantir que todas as Declarações Ambientais de Produto (DAP) de produtos, serviços e processos de construção sejam derivadas, verificadas e apresentadas de forma harmonizada, a fim de possibilitar a comunicação de informações ambientais verificáveis, apoiando escolhas justas, com base científica, estimulando o potencial de melhoria ambiental contínua (BS, 2019).

Aplicando as normas europeias, a ACV foi utilizada na avaliação dos impactos do carbono na reconstrução de edifícios do ensino superior (HAWKINS; MUMOVIC, 2017), avaliação ambiental de produtos cimentícios (CALDAS; TOLEDO FILHO, 2018), edifícios sustentáveis com custo mais baixo (BRAGANÇA; VIEIRA; ANDRADE, 2014), reciclagem de produtos de construção compostos (VLADMIROV; BICA, 2019), comparação entre esquemas de DAP (DURÃO *et al.*, 2020), entre outros.

Esse estudo foi baseado nas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014a), que regulamentam o uso da ACV, e nas normas europeias EN 15978 (BS, 2011) e EN 15804 (BS, 2019) devido à aplicação das mesmas a materiais e produtos da construção civil. O objetivo do estudo foi verificar e avaliar os impactos ambientais da produção de concreto a fim de sugerir meios para sua mitigação. A literatura científica contém estudos de ACV sobre concreto, porém, com abordagens diferentes. O Quadro 1 mostra alguns dos principais estudos sobre a aplicação da ACV na produção de concreto e suas abordagens.

Quadro 1 – Estudos de ACV sobre concretos encontrados na literatura científica e suas abordagens

Abordagem	Fonte
Tranporte	Asadollahfardi et al. (2015)
Concreto com diferentes designs de mistura	Asadollahfardi et al. (2015)
Comparação entre tipos de cimento	Borges et al. (2014)
Comparação entre bioconcreto e concreto convencional	Soleimani; Shahandashti (2017)
Comparação entre blocos de concreto e diferentes argamassas	Caldas; Toledo Filho (2018)
Agregados reciclados/gestão de resíduos de construção e demolição	Marinkovic, et al. (2010) ; De Schepper et al. (2014); Butera et al. (2015); Pentead; Rosado (2016); Goswein et al. (2018); Cuenca-Moyano et al. (2019); Yazdanbakhsh et al. (2018); Hackenhaar et al. (2019)
Avaliação do Ciclo de Vida do Concreto no Brasil	Silva et al. (2020b)
Avaliação do Ciclo de Vida de postes de concreto	Souza (2014)
Avaliação do Ciclo de Vida de argamassas	De Paula et al. (2018); Leite et al. (2018)
Impactos ambientais de materiais de construção	Medeiros et al. (2018); Chowdhury et al. (2010)
A inclusão de bens de capital na avaliação do ciclo de vida de produtos de construção	Silva et al. (2018)
Comparação entre esquemas EPD de produtos de construção	Durão et al. (2020)
Metodologia para uso de água em misturas de concreto	Fiori et al. (2014)
Métodos de avaliação de impacto	Mendes et al. (2016); Kim; Tae (2016)
Análise de incertezas	Silva et al. (2016); Pomponi et al. (2017); Morales et al. (2020)
Dados primários para inventário do ciclo de vida	Silva et al. (2020a)
O uso de argamassa de cinza volante	Goswein et al. (2018); Teixeira et al. (2019)
O uso de agregados de basalto na produção de concreto	Ingrao et al. (2014)

Fonte: Autores

Este estudo visa preencher uma lacuna no conhecimento sobre a ACV nas indústrias brasileiras de concreto da região Nordeste do Brasil, nas condições desta pesquisa. Outros estudos abordam a ACV da produção de concreto, mas sob diferentes condições. Além disso, os estudos encontrados não abordam a categoria de toxicidade humana, o que torna esta pesquisa relevante como parâmetro de comparação para outros estudos.

6.1.1 Componentes do concreto

Segundo Luz e Almeida (2012), o concreto de cimento Portland, como o utilizado nas empresas pesquisadas, é um produto básico da indústria da construção civil, sendo formado por: 42% de agregado graúdo (brita), 40% de agregado miúdo (areia), 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos. Os componentes do concreto, bem como sua função no traço e os impactos associados à sua extração/produção/utilização, estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Componentes do concreto, sua função e impactos associados

Componentes do concreto	Função no traço do concreto	Impactos associados à sua extração/produção/utilização
Agregados (brita e areia)	Contribuem para o aumento da resistência e da durabilidade, uma vez que são compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis e duráveis.	Exaustão das minas e falta de recuperação do ambiente degradado (JOSA; JORBA; VALLEJO, 2012), mudanças na paisagem (MURESAN; GLIGOR, 2015), na morfologia e qualidade do solo (TABATABAEI; MOHAMMADI, 2013); vibração do terreno (OZER et al., 2008); desmatamento (UBAQUE; VACA; RODRÍGUES, 2014), afugento da fauna (MILISA; ZIVKOVIC; HABDIJA, 2010), poluição do ar (PENG et al., 2016) e sonora (DUARTE et al., 2015) e desequilíbrio ambiental (VIEIRA; RESENDE, 2015).
Cimento	É o elemento fundamental de ligação entre os agregados. Essa ligação é o que determina a resistência final do concreto.	A produção de cimento causa impactos ao meio ambiente desde a extração da matéria-prima até sua disposição final, com a contaminação de solos e cursos d'água, assoreamento de rios e formação de material particulado, entre outros (MAURY; BLUMENSCHIN, 2012). Cerca de 5% a 7% das emissões mundiais de CO ₂ são provenientes da produção de cimento. É considerada uma das indústrias mais poluentes do setor da construção civil (FELIX; POSSAN, 2018).
Água	É reagente químico (reação de hidratação), agente refrigerante para conter a elevação da temperatura (reações exotérmicas) e atua no processo de cura.	Esgotamento dos recursos hídricos e contaminação do lençol freático (águas rasas e subterrâneas) durante o processo produtivo (LARUCCIA, 2014). Além da água utilizada na produção do concreto há, ainda, aquela usada para a lavagem dos caminhões e equipamentos e no processo de cura, que se configuram em efluentes gerados pelo sistema de produto.
Aditivos	Alterar propriedades do concreto melhorando sua qualidade (trabalhabilidade, resistência, compactidade, durabilidade, bombeamento e fluidez), aprimorando o desempenho: permeabilidade, retração, calor de hidratação, tempo de pega (retardar ou acelerar) e absorção de água.	Os principais impactos estão associados a emissões atmosféricas. A quantidade de CO ₂ e NO _x emitida para a produção de 1 kg de superplastificante é, apenas, um pouco menor que as emissões associadas à produção de cimento. Por outro lado, a quantidade de SO _x emitida é maior. No entanto, como a quantidade de aditivo usado no concreto é muito menor quando comparada ao teor de cimento, essas emissões atmosféricas podem contribuir menos, para o impacto ambiental geral da produção de concreto (VAN DEN HEEDÉ; BELIE, 2012), do ponto de vista do seu ciclo de vida, embora sejam relevantes quando avaliada, apenas, a indústria produtora dos aditivos

Fonte: Autores

6.2 Metodologia

Foram realizadas visitas em três indústrias de fabricação de concreto, localizadas em Teresina-PI, com o objetivo de acompanhar o processo produtivo desse material, bem como

coletar dados por meio de entrevistas com os gestores das empresas. Conforme o Termo de Confidencialidade firmado entre pesquisador/indústria, as mesmas não serão identificadas, sendo caracterizadas como A, B e C.

Foram elaborados questionários, contemplando todas as informações necessárias para a construção do ICV, que visa identificar as principais entradas e saídas do objeto de estudo. No universo de dados primários constam: consumo de água e energia; descrição e quantidade de máquinas e equipamentos; descrição dos processos; quantidade e tipo de resíduos produzidos; transporte de insumos até a fábrica e do concreto até o consumidor final, entre outros (Tabela 1 e 2). Os dados secundários foram obtidos na literatura científica e em relatórios especializados do setor, como Associação Brasileira Das Empresas De Serviços De Concretagem Do Brasil – ABESC (2007), Cimento.org (2021), Federación Iberoamericana De Hormigón Premesclado - FIHP (2021), IBRACON (2021), Luz e Almeida (2012), Mapa da obra (2013), Mehta e Monteiro (2014), Sindicato Nacional da Industria do Cimento – SNIC (2021)

6.2.1 Definição do objetivo, escopo e unidade funcional

O total produzido de concreto, anualmente, é de 35.918 m³, de acordo com os registros da empresa que forneceu essa informação (empresa A). Assim, o objetivo desse estudo é realizar a ACV da produção de 2.993,17 m³ de concreto (fluxo de referência), quantidade referente à média mensal produzida em uma indústria localizada em Teresina-PI. Para essa finalidade a coleta de dados foi feita de forma agregada, isto é, os insumos foram contabilizados como um todo, para a caracterização do desempenho ambiental do produto. O público-alvo desse trabalho são as usinas de concreto e os demais interessados, no setor da construção civil, bem como a comunidade acadêmica.

O concreto pode ser utilizado para diversas finalidades. Além do emprego direto nas construções de moradias e edificações, pode ser empregado em obras de saneamento básico, construção de túneis, pontes, postes de iluminação pública, entre outros. De forma geral, o concreto pode ser aplicado em, praticamente, todas as obras e construções. A função do produto fabricado nas indústrias pesquisadas é abastecer o mercado de Teresina-PI em nível local e regional, para aplicação em fundações, prédios, casas, de acordo com as especificações do cliente.

A unidade funcional definida é um metro cúbico de concreto e o valor do fluxo de referência é a produção de média mensal de 2.993,17 m³ de concreto. Existem períodos de sazonalidade, em que há diminuição da produção em função das condições climáticas da região.

Nos meses de janeiro a abril, a produção tende a diminuir devido à estação das chuvas na região em que o estudo foi desenvolvido. Esse fato impossibilita a produção, uma vez que o concreto não pode ser lançado na obra com chuva, que pode alterar sua qualidade.

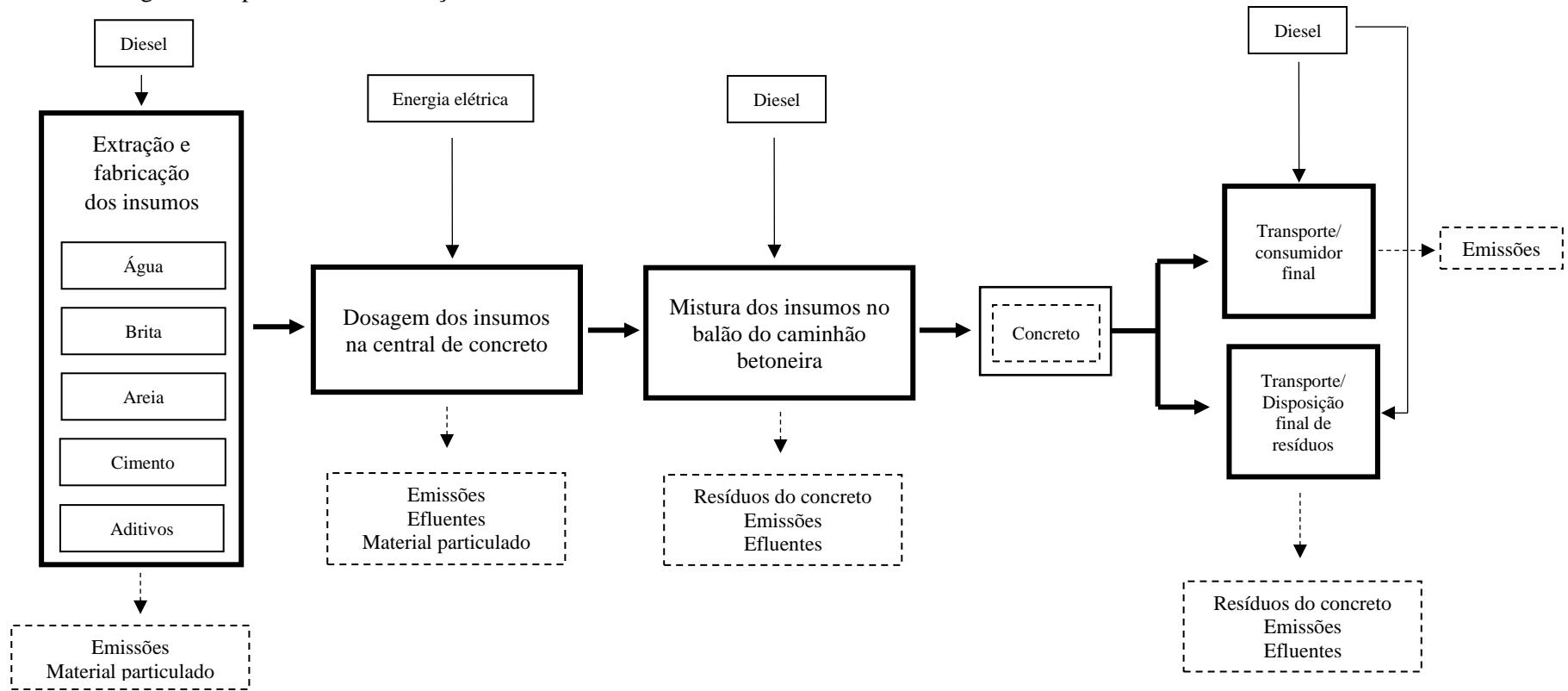
A fronteira do sistema é berço a portão da atividade industrial, acrescido, a montante, o transporte de insumos até a indústria e a jusante, o transporte de produtos ao consumidor final. As etapas verificadas foram: chegada e armazenamento dos insumos, o processo de mistura e dosagem para a produção do concreto, carregamento dos caminhões, transporte ao consumidor final e disposição final dos resíduos. O fluxograma do processo de fabricação de concreto está descrito na Figura 1.

Quanto à cobertura temporal, a coleta de dados teve como referência o ano de 2017. Quanto à cobertura geográfica, o estudo foi realizado em três indústrias de fabricação de concreto localizadas em Teresina, estado do Piauí, na região Nordeste do Brasil. Em relação à cobertura tecnológica, refere-se ao processo produtivo comumente utilizado em usinas de concreto brasileiras (BORGES *et al.*, 2014; NEVILLE, 2016; BRAGAGNOLO; KORF, 2020). A coleta de dados abrangeu fontes primárias, coletadas em campo, e fontes secundárias, obtidas na literatura científica e em relatórios especializados do setor.

A modelagem foi feita no OpenLCA 1.8, *software* gratuito, de código aberto, utilizado para análises de ACV (OpenLCA, 2020). A base de dados utilizada foi o Ecoinvent 3.7.1 *Cut-Off unit regionalized*. A atualização da base de dados Ecoinvent para a versão 3.7.1 trouxe muito dados regionalizados para o Brasil, conferindo maior robustez aos resultados da análise.

No modelo Cut-Off todas as trocas intermediárias (ou seja, trocas dentro da tecnosfera) são classificadas em "subprodutos alocáveis", "materiais recicláveis" ou "resíduos". A classificação é baseada no julgamento de especialistas sobre o valor de uma troca, potencial de uso e destino previsto (STEUBING *et al.*, 2016; WERNET *et al.*, 2016). O modelo é utilizado em outros trabalhos desenvolvidos recentemente (anos 2019/2020), que envolvem produtos da construção civil, no contexto brasileiro (HACKENHAAR *et al.*, 2019; MORALES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020a).

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação de concreto



Legenda

- Entradas
- Etapas do processo
- Saídas

Fonte: Autores

6.2.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Após a definição do objetivo e escopo do estudo, foi realizada a etapa de ICV. Os dados referentes às entradas e saídas do produto pesquisado foram contabilizados tendo em vista a produção média mensal de 2.993,97 m³ de concreto. Nas Tabelas 1 e 2 está descrito o ICV do processo de produção de concreto.

A base de dados utilizada foi o Ecoinvent 3.7.1 *Cut-Off unit regionalized*. A versão 3.7.1 do banco de dados Ecoinvent apresenta mais de 900 conjuntos de dados novos e 1.000 atualizados, incluindo dados brasileiros. Como resultado dessa atualização, o cenário de dados Ecoinvent agora inclui mais 100 produtos, expandindo a cobertura do banco de dados. As atualizações e acréscimos da versão 3.7 são o resultado da participação da associação Ecoinvent em vários projetos e colaborações com associações em diferentes setores industriais em todo o mundo (ECOINVENT, 2021).

Tabela 1 – Inventário do Ciclo de vida da produção de concreto: fluxo de entrada (*Inputs*)

<i>Inputs</i>				
Fluxo	Quant.	Un	Provedor	Notas Pedigree
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	14.4061313	t*km	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW</i>	(4;3;1;1;2)
<i>tap water</i>	122.401219	kg	<i>market for tap water tap water Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;2)
<i>sand</i>	998.319067	kg	<i>market for sand sand Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;3)
<i>plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde</i>	2.133661	kg	<i>market for plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde Cutoff, U - GLO</i>	(1;3;1;2;2)
<i>activated silica</i>	8.670319	kg	<i>market for activated silica activated silica Cutoff, U - GLO</i>	(1;2;1;1;2)
<i>gravel, crushed</i>	949.28	kg	<i>market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;4)
<i>electricity, medium voltage</i>	1.799321	kWh	<i>electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-North-eastern grid</i>	(1;2;1;1;2)
<i>cement, Portland</i>	272.529505	kg	<i>cement production, Portland cement, Portland Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;2)
<i>diesel</i>	2.22842	kg	<i>market for diesel diesel Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;2)

Fonte: Autores

Tabela 2 – Inventário do Ciclo de vida da produção de concreto: fluxo de saídas (*Outputs*)

<i>Outputs</i>				
Fluxo	Quant.	Unid.	Notas Pedigree	
<i>Concrete</i>	1	m ³	(1;1;1;1)	
<i>Particulates, fine mineral fibers</i>	0.27252919	g	(3;3;2;3;4)	
<i>Waste concrete</i>	24.9999833	kg	(3;2;5;3;4)	
<i>Wastewater from concrete production</i>	3.40004076	l	(3;3;2;4;4)	

Fonte: Autores

Para a escolha dos *inputs* e *outputs*, disponíveis no banco de dados do Ecoinvent 3.7.1, foram consideradas as características do inventário do processo produtivo em estudo. Com exceção do transporte, plastificantes e sílica ativa, todos os outros fluxos de entrada são de processos brasileiros. O conjunto de dados para o cimento descreve a produção de cimento Portland no Brasil. Sua aplicação inclui concreto armado estrutural, artefatos de concreto, concreto protendido e pisos industriais. Para a areia, o conjunto de dados contém a produção de concreto para uso na construção civil. Este conjunto de dados descreve a produção brasileira de areia para aplicação em materiais de construção. O conjunto de dados da brita descreve todo o processo de mineração em pedreiras. Esse conjunto de dados descreve a produção de brita, geralmente aplicada em materiais de construção, a partir de pedreiras de granito ou basalto, que representam o processo típico de extração de pedra no Brasil (ECOINVENT, 2021).

O conjunto de dados da água descreve a água encanada disponível ao usuário, no Brasil. Essa atividade começa com água canalizada, sob pressão, na estação de tratamento e alimentada na rede de distribuição e termina com 1 kg de água no consumidor (industrial ou doméstico). O conjunto de dados da água inclui a rede de distribuição e as perdas de água durante a transmissão. O conjunto de dados da energia elétrica inclui a produção de eletricidade na região nordeste do Brasil. Esta atividade começa com a eletricidade de média tensão chegando à estação transformadora e termina com 1 kWh de eletricidade de média tensão. Para o transporte, o conjunto de dados representa o serviço de transporte de carga de 1 t*km em um caminhão da classe de tamanho entre 16 e 32 toneladas métricas de peso bruto do veículo (GVW) e classe de emissões Euro IV (caminhões com mais de 6 anos de fabricação) (ECOINVENT, 2021).

Os aditivos incluem os diversos tipos plastificantes para concreto, à base de formaldeído de melamina sulfonada, como os utilizados nas indústrias estudadas. O conjunto de dados do diesel inclui o inventário para mercado regional brasileiro de produto de petróleo refinado, abrangendo a distribuição ao consumidor final, incluindo todos os transportes necessários, além da operação de tanques de armazenamento e postos de gasolina. A sílica ativada é usada, principalmente, como auxiliar coagulante no tratamento da água e na mistura com matérias-

primas para fabricação de produtos (como o concreto). Esse conjunto de dados é global e inclui o consumo de matérias-primas, usos de energia, infraestrutura e emissões (gasosas, efluentes líquidos, material particulado, resíduos sólidos).

Em relação aos *outputs* foram selecionados os fluxos correspondentes aos resíduos do concreto, efluentes e emissões de material particulado (provenientes do manejo do saco de cimento). O material particulado corresponde ao fluxo elementar de fibras minerais finas. O resíduo do concreto inclui a energia e emissões de partículas provenientes do desmantelamento e manuseio, o transporte para instalações de desmontagem e o descarte final. O efluente refere-se à água residual típica proveniente da fabricação de concreto (ECOINVENT, 2021).

6.2.3 Critério de escolha dos métodos de AICV

Existem diversas fontes para os bancos de dados de ICV e diferentes métodos de AICV, que contribuem para melhor executar os estudos de ACV. A escolha do método é feita tendo em vista o que melhor se adapta às necessidades do estudo, antes mesmo de calcular um sistema ou projeto de produto. Os meios para avaliar a significância ambiental dos resultados do inventário são os fatores de caracterização e modelos contidos nos métodos de AICV (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2016).

Não há um método elaborado para as condições do Brasil, o que dificulta a seleção entre os existentes. No entanto, existe uma iniciativa do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), por meio da Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (RAICV), criada em 2014 por pesquisadores com atuação na área de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que tem agregado esforços em AICV dentro do país, incluindo dentre suas atividades: adaptar e desenvolver modelos de caracterização para categorias de impacto, considerando o contexto ambiental e socioeconômico brasileiro. O primeiro produto decorrente das atividades da RAICV é a publicação do Relatório de Recomendações de Modelos de Avaliação de Impacto para o Contexto Brasileiro, visando contribuir com a comunidade de ACV, no Brasil, por meio da análise, proposição e adaptação de modelos contextualizados na realidade local (UGAYA; ALMEIDA NETO; FIGUEIREDO, 2019).

Assim, uma das formas de reduzir as incertezas em estudos brasileiros é por meio da escolha de mais de um método de AICV, garantindo maior confiabilidade aos resultados (PIEKARSKI *et al.*, 2012). A escolha de diversos métodos, com diferentes abordagens para a quantificação dos impactos possibilita diferentes interpretações (SOUZA, 2014), o que pode ter um resultado positivo ou negativo. Ugaya, Almeida Neto e Figueiredo (2019) afirmam que

quando existe mais de um modelo para a mesma categoria de impacto, resultando diferentes fatores de caracterização para os mesmos fluxos elementares, é necessário selecionar o modelo mais apropriado para o objetivo do estudo.

Na norma EN 15804:2019 (ES, 2019) são indicados diferentes métodos para a avaliação de impactos de produtos da construção civil, de acordo com a categoria abordada. Além dos métodos, na norma estão indicadas as categorias de impacto que devem ser avaliadas em estudos de ACV de materiais de construção civil. São dezesseis categorias, conforme descrito no Quadro 3. Para o contexto brasileiro, os métodos que mais têm sido utilizados em trabalhos recentes (anos 2019/2020), baseados na norma EN 15804:2019, são o ReCiPe Midpoint (H) e o CML (*baseline*) (MORALES, *et al.*, 2019; PASSUELO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020a; SILVA *et al.*, 2020b). Passuelo *et al.* (2019) justifica a escolha do método por estar entre os indicados pela norma EN 15804:2019.

Assim, nesse estudo, foram utilizados esses dois métodos, ReCiPe *Midpoint* (H) e CML (*baseline*), de modo comparativo para as categorias de impacto que possuem a mesma unidade de referência. Para as categorias que possuem unidade de referência diferentes, a análise foi feita de forma isolada, isto é, não foram comparados os resultados entre os métodos.

Quadro 3 – Métodos ReCiPe e CML e unidade de referência de acordo com as categorias de impacto indicadas na norma EN 15804:2019

Categorias de impacto	CML (<i>baseline</i>)	ReCiPe <i>Midpoint</i> (H)
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	kg CFC11 eq
Acidificação	kg SO2 eq	kg SO2 eq
Toxicidade humana cancerígena	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DCB
Mudanças climáticas	kg CO2 eq	kg CO2 eq
Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis	MJ	kg oil eq
Depleção de recursos abióticos – minerais e metais	kg Sb eq	kg Cu eq
Formação de ozônio fotoquímico	kg C2H4 eq	kg NOx eq
Eutrofização terrestre	kg PO4--- eq	
Formação de material particulado		kg PM2.5 eq
Radiação ionizante		kBq Co-60 eq
Uso da terra		m2a crop eq
Eutrofização aquática		kg P eq
Eutrofização marinha		kg N eq
Esgotamento de recursos hídricos		m3

Fonte: Autores

O ReCiPe *Midpoint* (H) apresenta dezoito categorias de impacto (GOEDKOOPE *et al.*, 2013), das quais, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre não são indicadas pela norma

EN 15803:2019. O ReCiPe foi escolhido por ser um método que integra e harmoniza as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura comum e consistente (STAFFORD *et al.*, 2016). O ReCiPe distingue dois níveis de indicadores: indicadores de ponto médio (*midpoint*) e indicadores de ponto final (*endpoint*) com as seguintes categorias: danos à saúde humana, danos ecossistemas e danos à disponibilidade de recursos (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2016).

As abordagens *midpoint* e *endpoint* do ReCiPe contém fatores de acordo com três perspectivas culturais: (I) *Individualist* (individualista): curto prazo, otimismo de que a tecnologia pode evitar problemas no futuro; (H) *Hierarchist* (hierarquista): modelo de consenso, frequentemente, encontrado em modelos científicos e, geralmente, considerado o modelo padrão; (E) *Egalitarian* (igualitário): longo prazo, baseado no pensamento do princípio da precaução. É bastante utilizado em trabalhos brasileiros, pois apresenta escopo de aplicação global para as categorias de impacto: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio e consumo de recursos (HUIJBREGTS, *et al.* 2017).

Das categorias do método CML (*baseline*) (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2016), apenas ecotoxicidade marinha não é indicada pela norma EN 15803:2019. O método CML (*baseline*) foi selecionado por apresentar um escopo de aplicação global para todas as categorias abordadas, com exceção para acidificação e formação de oxidantes fotoquímicos. O CML é indicado por Mendes, Bueno e Ometto (2016) para utilização em estudos desenvolvidos no Brasil, por sua abrangência global de aplicação.

Foram selecionadas para análise, de forma comparativa, as mesmas categorias analisadas no estudo de Silva *et al.* (2020b), uma vez que são indicadas na norma EN 15804 (ES, 2019): depleção da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, depleção de recursos abióticos fósseis, depleção de recursos abióticos não fósseis, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico. Quando possível, foram comparadas as categorias em comum aos dois métodos (CML e ReCiPe) e que possuem a mesma unidade de referência: depleção da camada de ozônio; aquecimento global; acidificação; toxicidade humana; ecotoxicidade de água doce.

Para que os resultados dos métodos possam ser comparados, é necessário que tenham a mesma unidade de referência. São elas: depleção da camada de ozônio; aquecimento global; acidificação; toxicidade humana; ecotoxicidade de água doce. Além disso, são as categorias que costumam emergir em ACVs de concreto (CALDAS; TOLEDO FILHO, 2018). As demais categorias foram analisadas pelos métodos ReCiPe *Midpoint* (H) e CML (*baseline*), separadamente, isto é, não foi feita a comparação entre os métodos, nessas categorias, pois a unidade de referência é diferente.

6.2.4 Normalização

Para esse estudo não foi adotada a etapa de Normalização dos resultados, uma vez que é um elemento opcional na ACV e deve ser utilizada com critério, pois pode alterar as conclusões derivadas da fase de AICV (ABNT, 2014a). Embora seja uma etapa útil, pois calcula a magnitude dos resultados dos indicadores de categoria, em relação a uma informação de referência, a sua utilização deve ser avaliada de acordo com a necessidade do estudo, uma vez que pode produzir dados inconsistentes.

Prado *et al.* (2019) demonstram que, para os métodos ReCiPe e CML, há uma tendência de obtenção dos mesmos resultados, após a normalização, independentemente do sistema analisado, negligenciando o peso e o desempenho relativo das categorias de impacto. Assim, os autores afirmam que adoção de resultados normalizados externamente deve ser reavaliada, pois pode influenciar a interpretação do desempenho ambiental geral para uma, ou algumas, categorias de impacto dominantes. Os métodos de interpretação que mascaram o papel dos sistemas de valores podem ser prejudiciais para a tomada de decisões.

Prado, Wender e Seager (2017) afirmam que a normalização externa sofre um viés sistemático que enfatiza as mesmas categorias de impacto, independentemente da aplicação. Conseqüentemente, estudos comparativos de ACV, que empregam normalização externa, podem resultar em recomendações dominadas pela referência de normalização e insensíveis à incerteza dos dados. Assim, nesse estudo, optou-se por não utilizar a etapa de normalização, uma vez que a comparação foi feita entre os métodos, e dentro da mesma categoria, a fim de manter a consistência dos resultados das categorias de impacto em suas respectivas unidades de referência.

6.2.5 Estimativa de incerteza

Em estudo de ACV, a qualidade e representatividade dos dados são essenciais, portanto, é necessário que seja declarada a sua incerteza, garantindo a confiabilidade dos resultados. A incerteza pode ser dividida em três categorias: parâmetros, cenário e modelo (ABNT, 2014a). A primeira refere-se às entradas e saídas dos processos e características tecnológicas. Nessa pesquisa foi possível calcular a incerteza, pois trabalhou-se com dados primários de três indústrias, cuja variação dos quantitativos no resultado final aponta as incertezas que correspondem a entradas/saídas do sistema (parâmetros).

A incerteza de cenário envolve definições sobre a unidade funcional, horizontes de tempo e procedimentos de alocação (SILVA *et al.*, 2016). Nesse estudo, não há incerteza em relação ao cenário, uma vez que houve fixação do mesmo. A incerteza de modelo inclui o cálculo dos indicadores na fase de avaliação de AICV, a qual está incluída no banco de dados secundários dos métodos adotados, que no caso desse estudo são o ReCiPe e o CML.

Nesse estudo, a incerteza, que pode ser proveniente de diversas fontes, está relacionada à qualidade dos dados do inventário, obtidos das fontes primárias, a qual foi avaliada através da Matriz de Pedigree, disponível no *software* OpenLCA. Foi aplicada a técnica de Monte Carlo, com 1.000 interações para a determinação da propagação da incerteza nos resultados, com um coeficiente de confiança de 95%.

Os dados de entrada de insumos não foram considerados estimados, uma vez que as indústrias forneceram o traço do concreto, registrado nos sistemas de entrada de matéria-prima. Também, foram fornecidos os talões de energia e água, possibilitando calcular a média anual de consumo e vincular com a produção do produto avaliado. Os dados estimados são aqueles relativos à saída do sistema: resíduos de concreto, volume de efluentes, emissão de poeira (material particulado) proveniente da abertura do saco de cimento e as distâncias percorridas para o fornecimento dos insumos e entrega ao consumidor final. No Quadro 4, está representada a Matriz de Pedigree e seus indicadores. Cada indicador é pontuado de acordo com a qualidade do dado, recebendo uma nota que varia de 1 a 5, onde 1 representa a melhor nota, e 5 a pior.

Para utilizar a Matriz de Pedigree é preciso o envolvimento de julgamentos, baseados nos conhecimentos obtidos em campo. A fim de aumentar a confiabilidade e diminuir a subjetividade na aplicação do método, as pontuações foram discutidas coletivamente, entre especialistas na área de ACV (os autores). O preenchimento da Matriz Pedigree possibilitou utilizar a análise estatística de Monte Carlo, disponível no *software* OpenLCA para calcular a incerteza absoluta, a qual é amplamente utilizada nos estudos de ACV (SILVA *et al.*, 2016). Os resultados dessa análise estão descritos na seção 6.4.6, análise de incerteza.

A Matriz Pedigree é a metodologia mais utilizada para estimativa de incertezas em estudos de ACV (GREGORY; MONTALBO; KIRCHAIN, 2013). É usada para avaliar as fontes de dados de acordo com cinco características independentes: confiabilidade, abrangência, correlação temporal, geográfica e tecnológica. A qualidade dos dados é avaliada objetivamente, pela sua origem. Os bancos de dados secundários trazem suas próprias incertezas para a Matriz de Pedigree. A necessidade de avaliar a incerteza em trabalhos de onde há produção de uso de dados primários, consiste na obtenção de resultados que sejam

adequadamente discutidos e, posteriormente, possam ser utilizados como banco de dados secundários em outros trabalhos.

Quadro 4 – Matriz de Pedigree

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5
Confiança	Dados verificados baseados em medidas	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativas qualificadas (ex. perito industrial)	Estimativas não qualificadas
Abrangência	Dados representativos de todos os locais relevantes para o mercado considerado e com período superior e adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o mercado considerado com período superior e adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de somente alguns locais (< 50%) relevante para o mercado considerado ou > 50% dos locais, mas com períodos curtos	Dados representativos de apenas um local relevante para o mercado considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e períodos curtos
Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Menos de 6 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Menos de 10 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Menos de 15 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença para o período do conjunto de dados
Correlação geográfica	Dados da área de estudo	Dados médios da grande área na qual a área de estudo está incluída	Dados da área com condições de produção semelhantes	Dados de área com condições de produção ligeiramente similares	Dados da área desconhecida ou área com muita diferença nas condições de produção
Correlação tecnológica	Dados de empreendimentos, processos e materiais em estudo	Dados de processos e materiais em estudo (ex. tecnologia idêntica), mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais em estudo, mas de diferentes tecnologias	Dado de processos ou materiais relacionados	Dados de processos relacionados em escala laboratorial ou de diferentes tecnologias

Fonte: Adaptado de Weidema *et al.*, 2013

As notas da matriz de Pedigree foram estabelecidas tendo em vista a qualidade dos dados coletados. O cimento, o diesel, a sílica ativa, a energia elétrica e a água receberam as seguintes notas: em relação à confiabilidade, correlação temporal e correlação geográfica foi atribuída a nota (1), pois a quantidade do material foi medida no local, são dados de um ano de produção e coletados na área de estudo. O indicador abrangência recebeu nota (2), pois é representativo para as empresas estudadas e para o período, mas pode variar em outras regiões. O indicador correlação tecnológica foi pontuado com nota (2), pois são dados de empresas diferentes com tecnologias idênticas

A brita e a areia receberam pontuação (1) para os indicadores confiabilidade, correlação temporal e correlação geográfica pois tiveram suas quantidades medidas no local, são dados de

um ano de produção e coletados na área de estudo. Para a abrangência, a nota foi (2), pois é um dado representativo para as empresas estudadas e para o período. No entanto, para o indicador correlação tecnológica, a brita recebeu pontuação (4), uma vez que a base de dados Ecoinvent não possui banco de dados para o mineral diabásio (do qual a brita utilizada nessas empresas é proveniente). Assim, atribuiu-se essa nota, pois são dados de processos e materiais similares ao utilizado nas empresas estudadas. Para a areia foi atribuída nota (3), nesse indicador, uma vez que os dados são de empresas diferentes, com mesmo material, mas tecnologias diferentes (tipo de dragagem)

Para os aditivos, a quantidade utilizada foi medida no local, sendo atribuída nota (1) à confiabilidade. O indicador abrangência foi pontuado com nota (3), é representativo para algumas empresas, pois pode variar em outras indústrias em termos de tipo e marca dos produtos utilizados, uma vez que é variável em função do tipo de concreto produzido. A correlação temporal e geográfica recebeu nota (1), pois são dados de um ano de produção e coletados na área de estudo, e a correlação tecnológica obteve nota (2), uma vez que os dados são de empresas diferentes com a mesma tecnologia.

O transporte recebeu a pior nota em relação à confiabilidade (4) e abrangência (3), pois as distâncias da chegada de matéria-prima foram estimadas entre as cidades, e não entre a indústria fornecedora do insumo e as empresas estudadas, e são representativos para alguns lugares, considerando o mercado estudado. Em relação à correlação temporal, geográfica e tecnológica, recebeu a mesma pontuação dos outros insumos (com exceção da brita e areia), (1), (1) e (2), respectivamente.

Dentre os *outputs* selecionados, o material particulado (proveniente da abertura do saco de cimento), o resíduo do concreto e o efluente receberam nota (3) para confiabilidade e (2) para abrangência, por serem dados estimados com base na literatura científica e representativos para a maioria das indústrias do setor. Para correlação temporal, o material particulado e o efluente foram pontuados com (2), pois os dados têm menos de 6 anos de diferença para o ano do estudo. Nesse mesmo indicador, o resíduo do concreto recebeu nota (5), é uma estimativa com mais de 15 anos de referência.

O indicador correlação geográfica, para o material particulado e resíduo do concreto, recebeu nota (3), por ser um dado de uma área similar à área de estudo. Nesse quesito, o efluente foi pontuado com nota (4) por ser um dado de área com condições de produção similares. Para o indicador correlação tecnológica foi atribuída nota (4) tanto para o material particulado, como para o resíduo de concreto e o efluente, por serem dados relativos ao mesmo material em estudo, mas com tecnologia diferente

6.2.6 Caracterização geral das usinas de produção de concreto

A indústria A foi instalada em Teresina-PI em 2014, tendo se estabelecido como a maior concreteira, em termos de volume de vendas, do mercado regional, desde o início de suas atividades. Faz parte de uma rede de usinas de concreto com filiais em todas as regiões do Brasil e, também, na Florida – EUA. A área ocupada pela indústria é de, aproximadamente, 5.500 m², na região do distrito industrial da cidade. Possui 17 funcionários divididos nas funções de: motoristas, operadores de máquinas, serviços gerais, uma secretária e o gestor da empresa.

A indústria B opera em Teresina desde 2013, em uma área de, aproximadamente, 20.000 m², também, na região do distrito industrial da cidade, com um quadro de 23 funcionários, divididos em diversas funções, semelhantes a indústria A. A indústria C, também, faz parte de uma rede de concreteiras espalhadas pelo país e fica localizada na zona norte da cidade, com uma área de, aproximadamente 23.000 m².

Além da central de concreto, as indústrias possuem, nas suas instalações, escritório, central de controle, refeitório para os funcionários, oficina para a manutenção dos caminhões e máquinas e laboratório onde está instalada a retífica de corpo de prova. A indústria A tem, ainda, um tanque para captação da água utilizada para a lavagem dos caminhões e outros serviços de limpeza, a qual é, parcialmente, reaproveitada.

Dentre as máquinas e equipamentos constam: caminhões betoneira, caminhões p/ bomba de concreto, bomba de concreto, central de concreto tipo P4, pá carregadeira, compressores, retífica de corpo de prova, prensa de 50 toneladas, balança, e a indústria A possui, ainda, um tanque de combustível 15.000 litros. A periodicidade de revisão das máquinas, equipamentos e frota varia de acordo com as especificidades de cada um. No geral, a central de concreto passa por revisões a cada 10.000 m³ de produção de concreto; os caminhões betoneira, a cada 4.000 litros de diesel consumido; a bomba de concreto, a cada 5.000 m³ de concreto e a pá carregadeira, a cada 3.000 litros de diesel. A modalidade de transporte é, exclusivamente, rodoviária e o frete é feito com frota própria, nas três indústrias.

Uma particularidade da indústria A, segundo informado pelo gestor, é a forma de etiquetagem dos corpos de prova (etiqueta plastificada com código de barras). Esse mecanismo foi patenteado pela empresa e visa aprimorar o controle, a rastreabilidade e a confiabilidade do processo, desde o momento da dosagem do concreto até a identificação dos corpos de prova. Através do código de barras contido nas etiquetas é possível saber se o corpo de prova está dentro dos prazos mínimos e máximos de uso e, caso não esteja, o material é rejeitado e

eliminado. Nas outras indústrias, a etiquetagem é feita escrevendo os dados diretamente no corpo de prova, com pincel específico para esse fim.

Os caminhões betoneiras saem lacrados das indústrias e o lacre só pode ser rompido pelo cliente, diante da conferência da nota fiscal que acompanha o carregamento. A partir dessa conferência, o concreto é liberado para ser lançado na obra. A capacidade de lançamento do concreto da indústria A, em particular, chega a uma altura de até 80 m, no entanto, a filial dessa empresa, localizada em Salvador, possui capacidade de lançamento de até 200 m, enquanto a de Maceió, lança à 50 m, apenas.

6.2.7 Descrição do processo produtivo

Os insumos necessários para a fabricação do concreto são provenientes de diversos fornecedores para as três concreteiras pesquisadas. Na indústria A a areia é fornecida por empresas de Teresina-PI; a brita é proveniente de Monsenhor Gil-PI; a empresa fornecedora de cimento fica em Recife-PE; e os aditivos são comprados em Salvador - BA. Na Tabela 3 constam as distâncias aproximadas dos fornecedores até a concreteira.

Assim que chegam à empresa, os insumos são armazenados nos lugares apropriados, ficando a areia e a brita em baias, no pátio da indústria, à céu aberto. O equipamento que faz a dosagem das matérias-primas é abastecido conforme a necessidade e a mistura é feita na quantidade apropriada para cada tipo de concreto, de acordo com a demanda. Os tipos mais frequentes são: autoadensável, leve, pesado, normal e de alto desempenho.

Tabela 3 – Distância dos insumos às indústrias

Insumo	Distância (km)
Brita	57
Areia	7
Cimento	1.150
Aditivos	1.200

Fonte: Gestor da indústria A

A dosagem das quantidades de areia, brita, água, cimento e aditivos é feita por uma central de controle, que pesa os insumos e libera o material de acordo com o tipo de concreto a ser produzido. Após a mistura, é feita uma verificação visual a fim de avaliar a necessidade de adição de água, dentro da betoneira. Assim que é aferida a qualidade do concreto, são retirados os corpos de prova e é colocado o lacre, para a certificação do cliente de que o produto não foi adulterado. O tempo para carregar o caminhão é de, aproximadamente, sete minutos e a

capacidade de volume do balão betoneira, para cada viagem, é de 8 m³, sendo 3 m³ o volume mínimo para entrega.

Por fim, é feita a limpeza do caminhão, retirando o concreto que, eventualmente, cai sobre a betoneira. Imediatamente, os caminhões são direcionados à entrega para os clientes, pois o tempo é crucial para garantir a qualidade do produto. Por esse motivo, é feito, previamente, o agendamento com o cliente para que o concreto possa ser lançado na obra assim que chegar ao destino. O volume de diesel gasto para as entregas é de 7.819,50 litros. A empresa atende um raio de, aproximadamente, 150 km ao redor de Teresina. Quando o caminhão betoneira chega ao canteiro, é feita a verificação das características do concreto, que devem coincidir com aquelas que foram especificadas no documento de entrega.

A água utilizada para lavagem das máquinas, equipamentos e frota, na indústria A, é reutilizada. Nas outras indústrias não há reaproveitamento dos efluentes. Os corpos de prova, nas três indústrias, são reaproveitados, por exemplo, para calçamento e construção de peças como bancos, mesas e a cerca limitando a propriedade. O resíduo de concreto é separado e recolhido por empresas de reciclagem que utilizam esse material para aterramento.

Nessa pesquisa, a estimativa dos efluentes gerados foi feita com base em Barreto (2015), na qual considera-se o volume total de água utilizado em todos os processos que envolvem a fabricação de concreto. Como o dado sobre a quantidade de água utilizada na empresa foi fornecido de forma agregada, isto é, obteve-se o total de água destinada a todos os usos da indústria (produção de concreto, instalações físicas como banheiros, refeitórios e lavagem dos equipamentos e frota), foi possível fazer a estimativa a partir dessa referência.

Os resíduos gerados na produção do concreto são na ordem de 2% da massa produzida. Isso significa que a cada 100 kg de concreto produzido, 2 kg são desperdiçados em forma de resíduo, incluindo os corpos de prova (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013). Estima-se, ainda, a geração de 0,1% de material particulado no manuseio do cimento (SOUZA, 2014). Assim, para cada saco de cimento de 50 kg, são emitidos 50 g de material particulado para o ar.

6.3 Resultados

6.3.1 Resultado da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Após a inserção dos dados no *software* OpenLCA é possível criar os processos e o sistema de produto, na base Ecoinvent 3.7.1, a partir dos dados levantados ou encontrados (primários e secundários). Foram selecionados dois métodos de AICV, CML (*baseline*) e

ReCiPe *Midpoint* (H), a fim de comparar os resultados das categorias de impactos que possuem a mesma unidade de referência e analisar as demais categorias, individualmente. Na Tabela 4 constam os resultados para cada uma das categorias de impacto de cada método, com suas respectivas unidades de referência (U.R.).

Tabela 4 – Resultado do Impacto do Ciclo de Vida para os métodos CML e ReCiPe

Categorias de impacto	CML	U.R. CML	ReCiPe	U. R. ReCiPe
Depleção da camada de ozônio	2.06E-5	kg CFC-11 eq	8.79E-5	kg CFC-11 eq
Aquecimento global	283.35	kg CO ₂ eq	285.12	kg CO ₂ eq
Acidificação	0.92	kg SO ₂ eq	0.94	kg SO ₂ eq
Toxicidade humana cancerígena	0.18	kg 1,4-DB eq	6.57	kg 1,4-DB eq
Toxicidade humana não cancerígena	0.18	kg 1,4-DB eq	68.03	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade de água doce	34.71	kg 1,4-DB eq	3.80	kg 1,4-DCB
Depleção de recursos abióticos (fósseis)	1856.01	MJ	43.20	kg oil eq
Depleção de recursos abióticos (minerais)	9.30E-4	kg Sb eq	0.76	kg Cu eq
Eutrofização	0.21	kg PO ₄ --- eq		
Formação de ozônio fotoquímico	0.04	kg C ₂ H ₄ eq		
Formação de ozônio fotoquímico, saúde humana			1.11	kg NO _x eq
Formação de ozônio fotoquímico, ecossistemas terrestres			1.12	kg NO _x eq
Formação de material particulado			0.34	kg PM _{2.5} eq
Radiação ionizante			2.92	kBq Co-60 eq
Uso da terra			15.36	m ² a crop eq
Eutrofização de água doce			0.013	kg P eq
Eutrofização marinha			0.001	kg N eq
Esgotamento de recursos hídricos			3.80	m ³

Fonte: Autores

Para compor o ICV do concreto, foram incluídos processos referentes à produção de cimento, sílica ativa, brita, areia, eletricidade, transporte, diesel, resíduos, entre outros. Esses processos foram modelados utilizando-se inventários da base de dados Ecoinvent, versão 3.7.1, com o sistema de alocação *Cut-Off by classification*, que trata produtos alocáveis, resíduos e recicláveis de forma diferente, isto é, assim como afirma Silva et al. (2020b, p.93), “não atribui cargas ambientais a matérias-primas constituídas de resíduos de outros processos (por exemplo, no coprocessamento)”.

A fim de comparar os resultados desse estudo com outros que representem a mesma realidade, foi utilizado o trabalho de Silva *et al.* (2020b), que faz uma análise sobre a avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. Os autores verificaram os potenciais impactos na formulação do concreto com diferentes tipos de

cimento (CP-III, CP-II-E e CP-II-F) e resistências (25 MPa, 30MPa, 35MPa e 40 MPa). Nessa pesquisa, o cimento utilizado nas indústrias é o CP-II-F. A comparação é relevante tendo em vista que os autores utilizaram o método CML, a mesma unidade funcional (1m³ de concreto), mesmo tipo de cimento e um conjunto de dados bastante semelhante ao utilizado nesse estudo.

Segundo Silva *et al.* (2020b) o uso de dados pouco representativos pode levar a conclusões erradas, que podem, inclusive, influenciar políticas públicas contraproducentes. Assim, a comparação entre os estudos possibilitou demonstrar a representatividade dos dados de indústrias localizadas em regiões geográficas diferentes, mas com muitas semelhanças em relação ao conjunto de dados, tecnologia adotada, o que pode auxiliar na criação de um banco de dados brasileiro de ACV.

Foram selecionadas para análise, de forma comparativa, as mesmas categorias analisadas no estudo de Silva *et al.* (2020b), uma vez que são indicadas na norma EN 15804 (ES, 2019): depleção da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, depleção de recursos abióticos fósseis, depleção de recursos abióticos não fósseis, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico.

Quando possível, foram comparadas as categorias em comum aos dois métodos (CML e ReCiPe) e que possuem a mesma unidade de referência: depleção da camada de ozônio; aquecimento global; acidificação; toxicidade humana; ecotoxicidade de água doce. Na comparação entre os métodos é possível perceber que os resultados das categorias de impacto, comuns às duas metodologias, são bastante semelhantes, com exceção à ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana, que obtiveram resultados bastante diferentes.

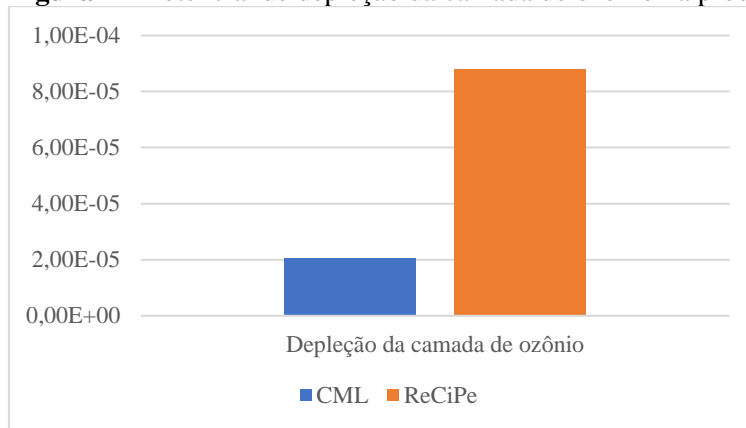
6.3.1.1 Depleção da camada de ozônio

Nessa categoria, o método ReCiPe apresentou resultado de impacto menor do que o CML (uma vez que são valores negativos). Ambos os métodos possuem escopo geográfico com abrangência em escala global. Devido ao esgotamento do ozônio estratosférico, uma fração maior da radiação UV-B atinge a superfície da Terra, o que pode ter efeitos prejudiciais à saúde humana, animal, ecossistemas terrestres e aquáticos, ciclos bioquímicos e materiais (GOEDKOOOP *et al.*, 2013; PRÉ CONSULTANTS, 2019). O potencial de depleção de ozônio de diferentes gases é expresso em kg de clorofluorcarbono equivalente (kg CFC-11 eq.). Na Figura 2 é apresentado o resultado dessa categoria.

A extração de petróleo (combustível fóssil), para a produção de cimento e combustíveis utilizados no transporte, é o processo que mais contribui, nessa categoria, seguido pela geração

de eletricidade e uma pequena participação da produção de sílica ativa. O coque de petróleo é a principal fonte de energia na indústria cimenteira, sendo o combustível mais utilizado no forno rotativo de clínquer (RIBAS *et al.*, 2016). Silva *et al.* (2020b) afirmam que o consumo de derivados de petróleo contribui para o potencial de destruição da camada de ozônio devido, também, ao uso de compostos halogenados em substâncias extintoras usadas em plataformas de petróleo.

Figura 2 – Potencial de depleção da camada de ozônio na produção de concreto em kg CFC-11 eq.



Fonte: Autores

O uso de diesel, para transporte dos insumos para a indústria e do produto para o consumidor final, gera emissões para o ar que impactam em todo o ciclo de vida do concreto, contribuindo para a depleção da camada de ozônio. Além disso, destacaram-se, em menor quantidade, as emissões de metano, provenientes da produção de cimento e monóxido de dinitrogênio gerado, tanto pelo diesel, no processo de transporte, como pela queima de carvão para geração de energia.

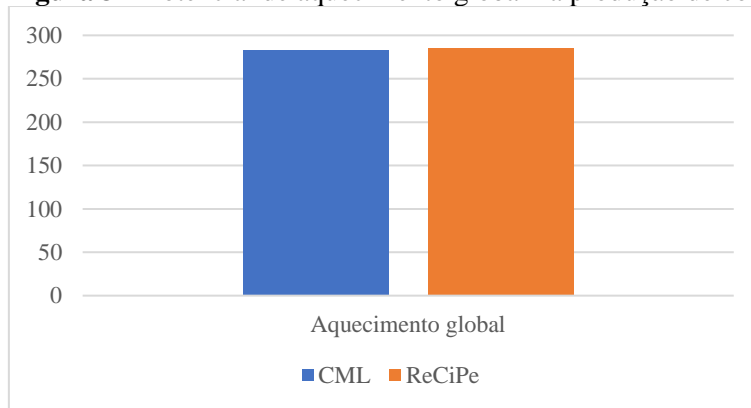
Os resultados encontrados nesse estudo, para o método CML, se aproximam dos resultados da pesquisa de Silva *et al.* (2020b), que demonstrou um potencial impacto, para essa categorial, com valores entre 1,0E-05 e 5,0E-05 kg CFC-11 eq, dependendo da resistência do concreto. Embora o valor encontrado para o método ReCiPe tenha sido menor, a diferença não é significativa tendo em vista a variação apresentada pelo estudo de Silva *et al.* (2020b), que pode ser explicada por outras variáveis (uso de aditivos, por exemplo) que podem ter influenciado os fatores de caracterização de cada método.

6.3.1.2 Aquecimento global

Para a categoria aquecimento global é considerado o potencial de emissões atmosféricas (gases de efeito estufa) que contribuem para o aquecimento global, o qual é expresso em um horizonte temporal de 100 anos, em kg de Dióxido de Carbono equivalente (kg CO₂ eq). As mudanças climáticas podem resultar em efeitos adversos na saúde humana, do ecossistema e no bem-estar material.

No método CML, os fatores de caracterização são baseados no modelo desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (PRé CONSULTANTS, 2019; IPCC, 2020), e no método ReCiPe, a base é o modelo FUND 2.0 (TOL, 2002). Conforme percebido na Figura 3, os resultados dos métodos foram muito próximos.

Figura 3 – Potencial de aquecimento global na produção de concreto em kg CO₂ eq.



Fonte: Autores

A fabricação de cimento é o processo que apresenta maior impacto, nessa categoria, por envolver emissões de CO₂, devido, principalmente, à produção de clínquer, onde ocorre o processo de calcinação e emissão de CO₂ e, também, a produção do coque de petróleo. O processo de geração de energia e produção de sílica tiveram menor participação, também, com destaque para as emissões de CO₂, responsáveis pelo aumento do aquecimento global. Além das emissões de CO₂, destacam-se as emissões de metano provenientes da queima de carvão. O teor de clínquer nos diferentes tipos de cimento resultam no aumento, ou diminuição, do impacto relativo ao aquecimento global (SILVA *et al.*, 2019).

Conforme feito na categoria anterior, a comparação com o trabalho de Silva *et al* (2020b) apontou resultados semelhantes para ambos os estudos e métodos. Os valores obtidos pelos autores apresentaram variação entre 200 e 400 kg CO₂ eq/m³, dependendo, também, da resistência do concreto. Os resultados encontrados nas indústrias pesquisadas indicam que o

impacto com aquecimento global pode ser mitigado optando por outro tipo de cimento. Assim, o uso do cimento CP-III (que apresentou o menor impacto potencial no estudo de Silva *et al.* (2020b) pode ser uma opção, também para as indústrias localizadas no Piauí. É certo que outras variáveis influenciam nessa categoria de impacto. No entanto, como a produção de cimento apresentou maior representatividade, a substituição pode ser viável para a diminuição dos impactos potenciais.

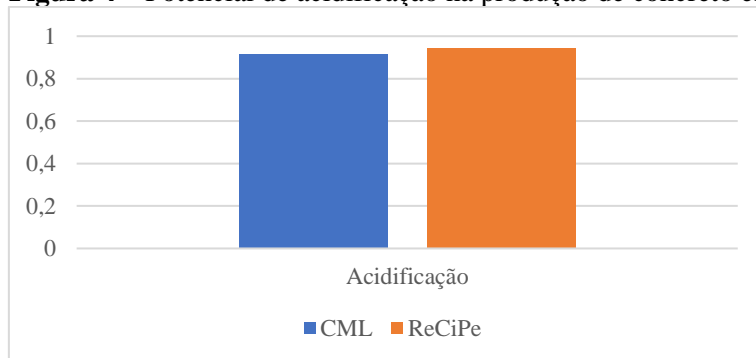
6.3.1.3 Acidificação

O indicador de impacto da acidificação avalia o potencial de emissões para o ar que resultam em deposição de chuva ácida na superfície da Terra, isto é, refere-se aos fatores relacionados ao potencial relativo de substâncias químicas liberadas para formar ácidos na atmosfera (BOLIN; SMITH, 2011). O potencial de acidificação é expresso em kg de dióxido de enxofre equivalente (kg SO₂ eq).

No método CML, essa categoria é chamada, simplesmente, de acidificação, enquanto no método ReCiPe é denominada acidificação terrestre. A deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, como sulfatos, nitratos e fosfatos, causa uma alteração na acidez do solo, processo chamado de acidificação. As principais emissões acidificantes são NO_x, NH₃ e SO₂ (GOEDKOOPE *et al.*, 2013). Ambos os métodos apresentam escopo regional para essa categoria.

As substâncias acidificantes causam uma ampla gama de impactos no solo, nas águas subterrâneas, nas águas superficiais, nos organismos, nos ecossistemas e nos materiais (edifícios) (PRÉ CONSULTANTS, 2019). O potencial de acidificação descreve o destino e a deposição de substâncias acidificantes e é expresso em kg de dióxido de enxofre equivalente (kg SO₂ eq.). Na figura 4 constam os resultados para os dois métodos.

Figura 4 – Potencial de acidificação na produção de concreto em kg SO₂ eq



Fonte: Autores

Em ambos os métodos, a produção de cimento e o transporte (relacionado às emissões de NO_x, SO₂ e Amônia provenientes da queima do diesel) foram os processos que mais contribuíram para esta categoria. Algumas etapas da produção de cimento e geração de energia elétrica, por exemplo, demandam energia não renovável (carvão e gás natural) o que potencializa os resultados para essa categoria. Além disso, as operações da mineração (explosões de rocha, principalmente) e uma pequena parcela da geração de efluentes, também, tiveram participação para o impacto de acidificação terrestre.

O estudo de Silva et al. (2020b) mostrou que, além da produção de cimento, a produção de brita contribui para os potenciais de acidificação e de eutrofização do concreto, devido a emissões decorrentes do uso de explosivos no desmonte de rocha, corroborando os achados nesse estudo. Os valores encontrados pelos autores variaram entre 0,5 e 1,5 kg SO₂ eq, sendo bastante próximos aos resultados dessa pesquisa, para ambos os métodos.

Ugaya, Almeida Neto e Figueiredo (2019) recomendam o método ReCiPe, para essa categoria, considerando o resultado da análise dos modelos de caracterização existentes para a categoria de impacto acidificação terrestre, a partir dos critérios relacionados ao escopo, robustez científica e disponibilidade de fatores de caracterização para o Brasil, indicando que o modelo de caracterização utilizado pelo ReCiPe é recomendado para aplicação no Brasil.

6.3.1.4 Depleção de recursos abióticos minerais e fósseis

Para a categoria depleção de recursos abióticos (minerais) o processo que aparece com o maior potencial de impacto é a mineração. Para o método CML, emergiu a mineração de brita e para o método ReCiPe, tanto as operações em pedreiras, como a mineração de areia, são processos impactantes para essa categoria. No método CML a unidade de referência é kg de antimônio equivalente (kg Sb eq) e, no método ReCiPe, os impactos são medidos em kg de cobre equivalente (kg Cu eq).

Vale mencionar que o mineral utilizado nas indústrias pesquisadas é o diabásio, diferente do que a base de dados Ecoinvent 3.7.1, o basalto. Os efeitos em relação ao método de extração (utilização de explosivos) pode ser o mesmo e promover efeitos semelhantes, mas alguns podem ser diferentes, tendo em vista o mineral utilizado. O resultado dos potenciais impactos foi 9,3E-4 Kg Sb eq, valores próximos aos encontrados por Silva *et al.* (2020b), entre 1,2E-5 e 1,5E-5. Kg Sb eq, para o cimento CP-II-F.

Na categoria depleção de recursos abióticos (fósseis), a produção de petróleo é o processo mais impactante, em ambos os métodos, com participação, para o método ReCiPe, do

processo de produção de energia. As unidades de referência para os métodos CML e ReCiPe são mega joule (MJ) e kg de óleo equivalente (kg oil eq), respectivamente. Ambos os métodos possuem abrangência geográfica global.

Nessa categoria, o trabalho de Silva *et al.* (2020b) atingiu resultados maiores a 1.500 MJ, menores que os valores encontrados nessa pesquisa (1.856 MJ). Semelhantemente à situação de outras categorias de impacto, o tipo de cimento utilizado pode viabilizar a diminuição do potencial impacto da depleção de recursos minerais, uma vez que, para o cimento CP-II-E os valores se aproximam de 750 MJ (SILVA *et al.* 2020b).

Os cimentos CP II (dentro os quais está incluído o CP-II-E e CP-II-F) são chamados de compostos pois apresentam, além da sua composição básica (clínquer e gesso), a adição de outro material, a escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. O CP II F é um tipo de cimento para uso e aplicação em geral. Ideal para utilização em estruturas de concreto armado, pavimentos de concreto, argamassa de chapisco, assentamento de blocos, entre outros. O CP II-E, por sua vez, é composto de 94% a 56% de clínquer e gesso e 6% a 34% de escória, podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa. O CP II-E, é recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento. (CIMENTO.ORG, 2021). Assim, esse tipo de cimento torna-se menos impactante devido ao seu menor consumo energético, quando comparado aos outros tipos.

6.3.1.5 Eutrofização

A categoria eutrofização terrestre não está presente no método ReCiPe, apenas no método CML. No método ReCiPe a categoria eutrofização abrange o escopo marinho e de água doce, que são categorias que não estão entre as indicadas pela norma EN 15804 (ES, 2019), por isso não foram analisadas. A produção de cimento é o processo mais impactante, seguido pelo transporte, tratamento de resíduos e explosões de rocha provenientes dos processos de mineração. Os fatores de caracterização para a eutrofização terrestre são expressos em kg de fosfato equivalente (kg PO₄--- eq).

O resultado encontrado foi de 0.20663 kg PO₄--- eq, muito próximo aos valores obtidos por Silva *et al.* (2020b), entre 1,5 e 2,0 kg PO₄—eq. Essa pequena diferença indica que, no caso dessa categoria, a resistência do cimento não representa grande influência para os potenciais impactos. Ainda assim, as emissões atmosféricas da produção de cimento como CO₂, NO_x, SO₂ e CO, são as principais causas para os impactos dessa categoria. Assim como encontrado por

Silva *et al.* (2020b), a produção de brita, também, contribui para os potenciais de eutrofização, devido a emissões decorrentes do uso de explosivos no desmonte de rocha.

6.3.1.6 Formação de ozônio fotoquímico

A formação de ozônio fotoquímico é uma categoria, que no método ReCiPe está subdividida em formação de ozônio fotoquímico – saúde humana e formação de ozônio fotoquímico – ecossistemas terrestres. A unidade de referência, para o método CML é kg de etileno equivalente (kg C₂H₄ eq) e, para o método ReCiPe, é expresso em estado de oxidação equivalente (kg de NO_x eq) tanto para saúde humana, como para ecossistemas terrestres.

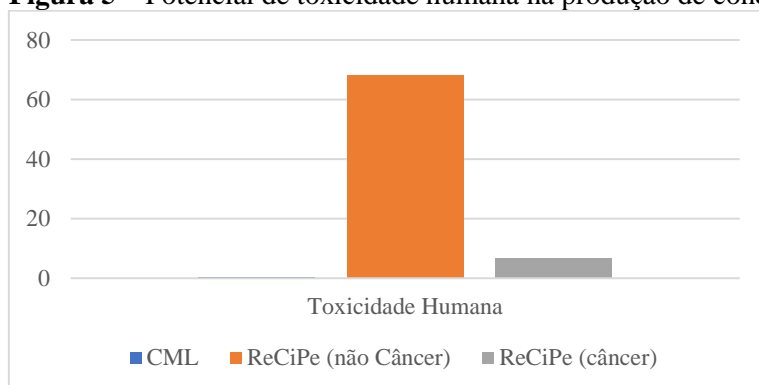
O processo que tem a maior contribuição, em ambos os métodos, é a produção de cimento. No entanto, há participação de, praticamente, todos os processos para o potencial impacto dessa categoria, mesmo que em menor grau. No método ReCiPe, está incluído, ainda, o processo de geração de efluentes, que não aparece para o método CML. O resultado dessa categoria foi 0,04372 kg C₂H₄ eq, também, muito próximo aos achados de Silva *et al.* (2020b), entre 0,3 e 0,5 kg C₂H₄ eq para o cimento CP-II-F, dependendo da resistência.

6.3.1.7 Toxicidade humana

Esta categoria refere-se aos efeitos de substâncias tóxicas no ambiente humano (saúde humana). Os fatores de caracterização são calculados por meio do Sistema Uniforme para Avaliação de Substâncias (*Uniform System for the Evaluation of Substances* – USES-LCA), adaptado para fins de ACV, que descreve o destino, a exposição e os efeitos de substâncias tóxicas (PRÉ CONSULTANTS, 2019).

O método CML considera um horizonte de tempo infinito e o ReCiPe considera as emissões em termos anuais (SOUZA, 2014). No método ReCiPe, essa categoria está subdividida em cancerígena e não cancerígena. As substâncias tóxicas têm seus valores expressos em kg 1,4-DB eq. Na figura 5 está demonstrada a comparação entre os resultados dos dois métodos, para essa categoria.

O processo de produção de sílica ativa possui a maior contribuição para o método CML e ReCiPe (na categoria não cancerígena) seguido pelos processos de produção de cimento e mineração. Na categoria cancerígena, do método ReCiPe, os processos há uma inversão entre os processos de produção de sílica e cimento, sendo a produção de cimento em primeiro lugar, como mais impactante, seguido da sílica e mineração.

Figura 5 – Potencial de toxicidade humana na produção de concreto em kg 1,4-DB eq

Fonte: Autores

Em ambos os métodos, o impacto da geração de resíduos aparece como contribuinte para toxicidade humana. No documento elaborado pelo IBICT (ACV-IBICT, 2020), consta a afirmação de que a toxicidade humana é a categoria de impacto ambiental resultante do aumento da concentração de substâncias tóxicas, provenientes da disposição de resíduos/rejeitos, que geram potenciais danos à saúde, o que corrobora os resultados da análise, para essa categoria.

O processo de fabricação de aditivos, também, contribui para o impacto dessa categoria. Sua proeminência é considerável tendo em vista a baixa proporção em massa no concreto. Medeiros, Durante e Callejas (2018) apontam a importância de analisar a categoria toxicidade humana em ACVs de materiais construtivos devido à quantidade de emissões (atmosféricas, de efluentes, resíduos etc.), muitas vezes, tóxicas, provenientes dos processos produtivos que envolvem essas indústrias.

Não foram encontrados estudos de ACV que abordam a produção de concreto e a categoria toxicidade humana sob a mesma perspectiva dessa pesquisa. Os estudos que incluem essa categoria de impacto possuem diferenças que impossibilitam a comparação, por exemplo, estão relacionados a sistemas construtivos, produção com o uso de materiais reciclados, conjunto de dados e localização geográfica muito diferentes, outra unidade funcional e outros métodos de AICV (De SCHEPPER, 2014; GURSEL; OSTERTAG, 2017; SOLEIMANI; SHAHANDASHTI, 2017; MEDEIROS, DURANTE E CALLEJA; 2018; CUENCA-MOYANO, 2019).

Os trabalhos desenvolvidos no Brasil, com a mesma perspectiva desse estudo (unidade funcional, conjunto de dados semelhantes, métodos de AICV), não avaliam/abordam essa categoria, o que torna essa pesquisa ainda mais relevante para que novos estudos possam ter

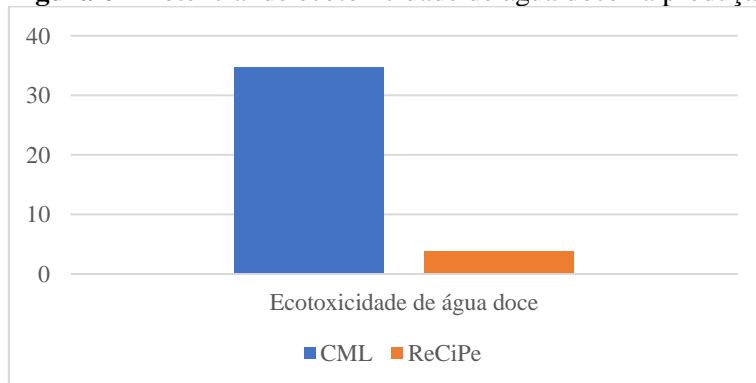
um parâmetro de comparação sobre os potenciais impactos para a toxicidade humana, na produção de concreto, em indústrias brasileiras.

6.3.1.8 Ecotoxicidade de água doce

Um organismo, ou ambiente, quando exposto a determinadas substâncias tóxicas, podem sofrer danos, algumas vezes, irreversíveis. O grau de toxicidade de uma substância é determinado pela concentração e propriedades químicas que a compõem (COSTA *et al.*, 2008). Assim, as categorias de impacto relativas à ecotoxicidade (marinha, de água doce e terrestre) e toxicidade humana estão relacionadas ao potencial de toxicidade que uma substância possui, a ponto de causar um efeito danoso a um organismo vivo ou a um ecossistema. As substâncias tóxicas têm seus valores expressos em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente (kg 1,4-DB eq).

No método ReCiPe o fator de caracterização para ecotoxicidade e toxicidade humana considera três fatores: a persistência ambiental dos produtos químicos, isto é, seu destino; sua ingestão por seres humanos e acúmulo na cadeia alimentar, relacionado à exposição; e a toxicidade de um produto químico, isto é, os efeitos nos seres humanos e nos ecossistemas (GOEDKOOPE *et al.*, 2013). No método CML, esses indicadores de categoria referem-se ao impacto nos ecossistemas, como resultado das emissões de substâncias tóxicas no ar, na água e no solo. O potencial de ecotoxicidade, no CML, é calculado, também, descrevendo o destino, a exposição e os efeitos de substâncias tóxicas, com horizonte temporal infinito (PRÉ CONSULTANTS, 2019). O potencial para categoria de ecotoxicidade de água doce está expresso na Figura 6.

Figura 6 – Potencial de ecotoxicidade de água doce na produção de concreto kg 1,4-DB eq



Fonte: Autores

O método CML apresentou valores para o potencial de impacto, nessa categoria, muito maiores que o método ReCiPe. Uma das razões é o fato de que o primeiro possui abrangência global, enquanto para o segundo, o escopo é regional. As categorias de impacto, como os potenciais de ecotoxicidade, acidificação e eutrofização, normalmente, dependem do local ou região no qual ocorrem (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016), o que pode, também, explicar essa diferença nos resultados dos métodos, considerando a abrangência geográfica dos mesmos.

Para ecotoxicidade de água doce, o processo de tratamento e disposição de resíduos é o maior contribuinte para os impactos, em ambos os métodos. Tanto o CML, como o ReCiPe consideram as emissões de longo prazo para as águas subterrâneas, com destaque para as emissões de íons de cobre e zinco. A produção de cimento e sílica ativa, também, aparecem como processos impactantes, nessa categoria, seguidas por produção de energia e mineração de brita. No estudo de Silva *et al.* (2020a), sobre produtos brasileiros da construção civil, as emissões provenientes de resíduos e de rejeitos de mineração, também, foram os maiores contribuintes para as categorias relativas à ecotoxicidade

6.3.1.9 Resultado das demais categorias de impacto

As categorias formação de material particulado, radiação ionizante, uso da terra, eutrofização de água doce e marinha e esgotamento de recursos hídricos são encontradas, apenas no método ReCiPe. Os processos mais impactantes, para essas categorias, são, respectivamente: produção de cimento, tratamento de resíduos, construção de estradas, tratamento de resíduos e produção de energia.

Os resultados apontam que todos os processos que envolvem a produção de concreto são potencialmente impactantes, em maior ou menor grau, dependendo da categoria de impacto a ser analisada. No entanto, a produção de cimento, é o maior destaque, pois aparece como o processo que causa o maior impacto na maioria das categorias. Silva *et al.* (2019) afirmam que há variação nos impactos da produção de cimento de acordo com o tipo e que a seleção de fornecedores, para uso na fabricação de produtos da construção civil, com base no desempenho ambiental das indústrias avaliadas, pode contribuir com a sustentabilidade geral de produtos da construção que envolvem o uso do cimento, como o concreto.

6.3.2 Resultado da análise de incerteza

Não existem dados científicos que não se conheça a sua incerteza (medida ou estimada). Somente com esse parâmetro é possível estabelecer comparações entre resultados e descobrir

diferenças que são significativas ou não. Quando as incertezas não podem ser medidas, por exemplo, determinando o desvio padrão, podem ser, ao menos, estimadas, através da qualidade dos dados obtidos. O conhecimento sobre a origem dos dados e sua aplicabilidade aos sistemas de estudo permitem construir uma matriz de Pedigree.

Estudos de ACV requerem transparência na comunicação dos resultados e, uma das formas de garantir a confiabilidade dos mesmos é por meio da análise de incertezas. Para isso, utilizou-se a matriz Pedigree, a fim de atribuir aos dados valores padronizados de incerteza básica, de acordo com a sua qualidade. A incerteza adicional está incluída nas bases de dados utilizadas (ReCiPe e CML). Nas situações em que diferentes parâmetros, com incertezas variadas, vão interagir através de uma relação complexa, a incerteza dos resultados pode ser mais convenientemente encontrada através de uma simulação de Monte Carlo. Assim, a análise de incerteza foi feita por meio da simulação de Monte Carlo, presente no *software* OpenLCA.

A simulação determina valores aleatórios para os dados de entrada de acordo com a distribuição probabilística informada para cada dado. A técnica de Monte Carlo é amplamente utilizada para analisar incertezas em diferentes produtos, áreas de pesquisa e setores industriais. (POMPONI; D'AMICO; MONCASTER, 2017). Portanto o procedimento executado está em sintonia com os melhores procedimentos científicos de determinação de incertezas em tais situações. Os métodos de simulação de Monte Carlo são de baixa convergência e demandam grande esforço computacional para atingir resultados aceitáveis.

A análise foi feita com 1.000 interações, com distribuição lognormal e intervalo de confiança de 95% para cada uma das categorias associadas aos métodos ReCiPe e CML. Goedkoop *et al.* (2016) recomendam utilizar, no mínimo, 1.000 interações quando se deseja representar a distribuição de resultados graficamente. Essa quantidade de interações, também, foi utilizada em outros trabalhos sobre materiais construtivos, que envolvem a análise de incertezas por meio da simulação de Monte Carlo (SILVA *et al.*, 2016; MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018). Heijungs (2020) afirma que, normalmente, são executadas 1.000 ou 10.000 interações, mas com o tamanho crescente dos bancos de dados ACV, um número excessivamente alto de execuções pode ser inviável pela demora na obtenção dos resultados.

Na Tabela 5 constam os resultados, obtidos pela técnica de Monte Carlo, da média e do desvio padrão para cada uma das categorias de impactos dos dois métodos adotados (ReCiPe e CML). Na Figura 7 está demonstrada a comparação dos resultados da simulação, para as categorias selecionadas para análise, nesse estudo. A notação da Tabela 5 é comum na

engenharia e indica a potência de 10 correspondente, por exemplo, 2E+3 corresponde ao valor 2000 (ou 2×10^3)

Uma análise comparativa das incertezas frente aos valores médios de cada categoria de impacto pode ser obtida pelo desvio padrão relativo ou coeficiente de variação (Tabela 6). As maiores incertezas nas categorias de impacto, em ambos os métodos, estão nas categorias toxicidade humana cancerígena e não cancerígena.

Tabela 5 – Resultado da análise de incerteza pela simulação Monte Carlo (1.000 interações e 95% de confiança)

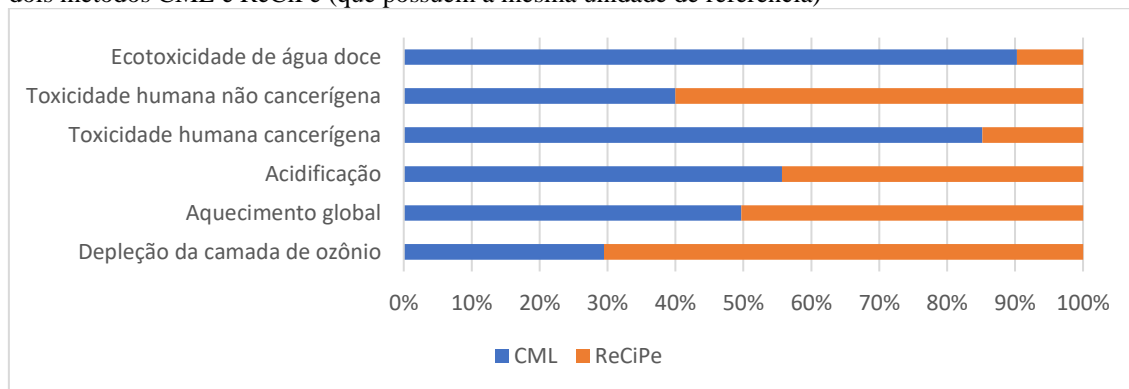
Categorias de impacto	CML		ReCiPe	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Depleção da camada de ozônio	1,72E-03	8,05E-04	4,11E-03	9,64E-04
Aquecimento global	7,99E+03	5,02E+02	8,09E+03	6,04E+02
Acidificação	3,21E+01	3,52E+00	2,56E+01	3,67E+00
Toxicidade humana cancerígena	4,46E+03	6,44E+03	7,76E+02	7,71E+02
Toxicidade humana não cancerígena	4,46E+03	6,44E+03	6,69E+03	4,91E+03
Ecotoxicidade de água doce	2,31E+03	2,44E+03	2,49E+02	1,44E+02
Depleção de recursos abióticos (fósseis)	1,16E+05	9,98E+03	2,71E+03	2,68E+02
Depleção de recursos abióticos (minerais)	3,40E-02	1,44E-02	1,72E+01	6,12E+00
Eutrofização terrestre	8,42E+00	1,82E+00	-	-
Formação de ozônio fotoquímico	1,22E+00	2,49E-01	-	-
Formação de ozônio fotoquímico, saúde humana	-	-	3,77E+01	5,97E+00
Formação de ozônio fotoquímico, ecossistemas terrestres	-	-	3,85E+01	6,12E+00
Formação de material particulado	-	-	1,10E+01	1,81E+00
Radiação ionizante	-	-	2,26E+02	2,31E+02
Uso da terra	-	-	3,95E+02	2,10E+02
Eutrofização de água doce	-	-	9,58E-01	5,20E-01
Eutrofização marinha	-	-	6,73E-02	1,69E-02
Esgotamento de recursos hídricos	-	-	-1,28E+02	4,24E+02

Fonte: Autores

Tabela 6 – Coeficiente de variação (%)

Categorias de impacto	C.V. / CML	C.V. / ReCiPe
Depleção da camada de ozônio	46,8	23,5
Aquecimento global	6,3	7,5
Acidificação	11,0	14,3
Toxicidade humana cancerígena	144,4	99,4
Toxicidade humana não cancerígena	144,4	73,4
Ecotoxicidade de água doce	105,6	57,8

Figura 7 – Resultado da análise de incerteza dos impactos ambientais potenciais para as categorias comuns aos dois métodos CML e ReCiPe (que possuem a mesma unidade de referência)



Fonte: Autores

Para o método CML, foi constatado que os maiores graus de incerteza estão nas categorias depleção de recursos abióticos (fósseis), aquecimento global e toxicidade humana. Para o método ReCiPe, as maiores incertezas foram apresentadas nas categorias aquecimento global e toxicidade humana não cancerígena. Em ambos os métodos, os menores valores foram atribuídos à categoria depleção da camada de ozônio. Os resultados apontam a mesma tendência para os dois métodos, em relação às incertezas apresentadas.

Segundo Mendes, Bueno, Ometto (2016), o potencial impacto para as categorias de relativas à ecotoxicidade, acidificação e eutrofização, normalmente, dependem do local ou região em que ocorrem, enquanto o potencial de depleção da camada de ozônio é de caráter global e tende a ser mais representativos. Essa condição pode explicar o fato de a categoria relativa à toxicidade humana apresentar alto grau de incerteza, enquanto a incerteza atribuída à categoria depleção da camada de ozônio foi baixa, para ambos os métodos.

Na comparação entre as categorias comuns aos dois métodos, é possível perceber que, para o método CML, as categorias associadas à ecotoxicidade e toxicidade humana cancerígena apresentaram proeminência muito maior do que para o método ReCiPe. As demais categorias apresentaram valores próximos de incerteza, com exceção de depleção da camada de ozônio que, para o método ReCiPe, os valores foram maiores. Uma das justificativas está relacionada à abrangência geográfica, adotadas pelos métodos para a categoria relativa à ecotoxicidade e toxicidade humana: global para o CML e regional para o ReCiPe. Além disso, essas categorias têm como contribuinte, para a potencialização dos impactos, o tratamento de resíduos, que obteve as piores notas atribuídas na matriz de Pedigree, em função das estimativas feitas para esses insumos.

Outro fator que influencia a incerteza de um estudo é o uso de dados secundários e estimados. Os cenários com os melhores resultados na análise de incerteza são aqueles em que

a maioria dos dados utilizados são primários (coletados *in loco*). A utilização de dados secundários promove uma distribuição aleatória mais dispersa e maior nível de incerteza em estudos de ACV (FIORI, CYBIS, FERNANDES, 2014). Silva *et al.* (2018), também, sugerem que dados estimados aumentam as incertezas, especialmente, em estudos sobre materiais de construção. Uma das opções para reduzir as incertezas é ampliar a fronteira do sistema para berço ao túmulo, com a modelagem de dados primários que representem melhor a realidade da área em estudo. A falta de dados impossibilitou adotar essa fronteira para esse estudo. A redução das incertezas é uma meta científica e prática pois permite ter conclusões mais assertivas em comparações de cenários

A categoria aquecimento global, apresentou valores praticamente idênticos para os dois métodos, embora seja, relativamente, alto. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que no cálculo para o potencial de aquecimento global é adotado o indicador do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2020), o que garante maior robustez científica, com incertezas descritas e calculadas (HAUSCHILD *et al.*, 2013), gerando valores iguais nos dois métodos adotados.

Assim, as maiores incertezas ocorreram nas categorias em que os dados do inventário foram estimados, indicando a necessidade de maior qualidade dos dados e do uso de dados primários consistentes. Além disso, a abrangência do método influencia no grau de incerteza, corroborando a necessidade de mais dados de inventário regionalizados para as características brasileiras.

6.4 Discussão e interpretação dos resultados

A produção do concreto acarreta vários impactos ambientais, em maior ou menor proporção, que podem ser mitigados com adoção de diferentes estratégias. A produção de cimento é um dos processos mais impactantes no ciclo de vida do concreto. Uma das formas de reduzir o impacto das emissões de gases de efeito estufa, que afetam diretamente as categorias mudanças climáticas e depleção da camada de ozônio, é através da utilização de algum material em substituição ao cimento, verificando a possibilidade de acordo com a aplicação pretendida.

De Paula *et al.* (2018) observaram, em seu estudo, que cada kg de cimento substituído por algum material cimentício suplementar, originado de algum resíduo, poderia reduzir até 1 kg das emissões de CO₂. É importante salientar que existem alguns materiais cimentícios suplementares que também precisam ser calcinados, como o metacaulim, ou que precisam de

outro tratamento intensivo em energia, o que pode representar aumento dos impactos. Portanto, a substituição deve ser feita com cautela, preferivelmente, por material originado de algum resíduo.

Caldas e Toledo Filho (2018) afirmam que uma medida efetiva para a redução dos impactos ambientais de produtos que utilizam cimento em sua composição é a utilização de cimentos compostos (com menor teor de clínquer), como CPIII ou CPIV que, em seu estudo, demonstraram ser os menos impactantes. O cimento utilizado nas indústrias pesquisadas é o CPV-ARI. Uma alternativa para essas indústrias é utilizar o CPII F-32, composto com fíler calcário que, embora não esteja entre os indicados por Caldas e Toledo Filho (2018), é um material composto, com menor teor de clínquer, o que contribui para a mitigação do impacto das emissões atmosféricas, quando comparado com o cimento CPV-ARI.

Silva *et al.* (2019) afirmam que tipos diferentes de cimento, com diferentes teores de clínquer, juntamente com variações no design da mistura (teor de cimento) resultam no aumento, ou diminuição, do impacto relativo ao aquecimento global. Portanto, a escolha do tipo de cimento influencia, diretamente, no grau de impacto referente às mudanças climáticas.

Os materiais disponíveis para a substituição do cimento, normalmente, são subprodutos ou resíduos de outros processos industriais, o que torna esta alternativa uma solução, tanto para a redução do impacto das emissões atmosféricas, como para o problema do acúmulo de resíduos, com a redução dos mesmos. Os principais materiais substitutos, utilizados nas concreteiras, são: sílica ativa, cinza volante, escória de alto-forno, cinzas de casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar, entre outros (BORGES *et al.*, 2014; MOLIN FILHO, *et al.*, 2019; TEIXEIRA *et al.* 2019).

Nas indústrias visitadas utiliza-se a sílica ativa como material cimentício suplementar. A sílica ativa é um dos materiais utilizados para substituir parcialmente o cimento, ou como simples adição, aumentando a quantidade de aglomerante na composição do concreto (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017). O processo de produção de sílica ativa, no entanto, apresentou contribuição significativa no impacto global do ciclo de vida do concreto, nas categorias depleção da camada de ozônio, aquecimento global, toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce, e sua utilização com fins de redução de impactos, nas indústrias pesquisadas, precisa ser analisada pontualmente.

De Paula *et al.* (2018) concluíram que a substituição de cimento Portland, em argamassas, por resíduos de cerâmica vermelha é eficaz para a redução da maioria de impactos ambientais gerados durante o processo produtivo. Outro estudo demonstrou que o uso de cinzas volantes obtidas da queima de carvão mineral e biomassa promove a diminuição dos impactos

ambientais de produção das argamassas e ganhos de resistência mecânica e durabilidade (TEIXEIRA *et al.* 2019).

A escória de alto forno é outro substituto que pode ajudar a promover resistência mecânica e reduzir o consumo de cimento garantindo a mesma trabalhabilidade (BORGES *et al.*, 2014). As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar foram usadas em um estudo, que atestou bom desempenho nas resistências à tração e compressão (MOLIN FILHO, *et al.*, 2019). Portanto, estudos pontuais devem ser feitos para avaliar a possibilidade de substituição, de acordo com o contexto geográfico/ambiental em que a indústria está inserida e, também, com a verificação se as propriedades do composto atenderão a demanda para a aplicação pretendida do concreto, a fim de obter redução dos impactos ambientais gerados durante o processo produtivo. No entanto, é importante ressaltar que, nestes estudos onde foram utilizados materiais cimentícios substitutos provenientes de resíduos, não foi considerado o processo de alocação, o que pode mudar os resultados.

Em relação à substituição dos agregados naturais (brita e areia) por agregados reciclados, como os resíduos da construção civil (RCD), existem diversas opções como os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (LEITE *et al.*, 2018), resíduos de postes de concreto (FERREIRA *et al.*, 2016), assim como os resíduos produzidos dentro das próprias obras (EVANGELISTA; COSTA; ZANTA (2017), que podem ser utilizados para esse fim. Os RCDs são capazes de gerar agregados de alta qualidade, comprovados por ensaios de resistência à compressão, à tração e à flexão (KABIR; AL-SHAYEB; KHAN, 2016).

O uso de RCDs, no Brasil, é regulamentado pela Resolução 307, de 5 de julho de 2002, do CONAMA, que estabelece as diretrizes, os critérios e os procedimentos para a gestão desses resíduos, com o objetivo de promover a redução, reutilização ou reciclagem dos mesmos. Os resíduos são classificados de acordo com o tipo, e a sua deposição não pode ser feita em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. No Brasil, não é permitido utilizar agregados reciclados para concretos estruturais (BRASIL, 2002).

No entanto, é preciso avaliar a viabilidade econômica, tecnológica, transporte, entre outros fatores para que o uso dessa alternativa não se torne mais impactante para o meio ambiente ou inviável economicamente (COELHO; BRITO, 2013). Nesse contexto, a triagem é um dos processos mais importantes para o uso eficiente de RCDs. Santana *et al.* (2019) acreditam que a classificação adequada pode promover a reutilização integral e racional dessas matérias-primas secundárias em diferentes produtos à base de cimento, no setor da construção. Penteadó e Rosado (2016) salientam que a triagem eficiente nos canteiros de obras evita o

transporte para outras instalações de reciclagem, garantindo que os processos de tomada de decisão sejam baseados em aspectos técnicos e ambientais, e não, apenas, econômicos. A questão logística pode ser um entrave para o uso de RCDs e precisa ser cuidadosamente considerada quanto o objetivo é a redução de impactos ambientais.

Um estudo desenvolvido na área de Nova York, demonstrou que a utilização de RCD como agregado de concreto não afeta, significativamente, o impacto ambiental da produção de concreto, naquela região. No entanto, o uso do concreto reciclado evita a deposição em aterros, reduzindo o impacto desse acúmulo. A demanda por transporte e cimento (os maiores estressores ambientais da produção de concreto), devem ser avaliados conjuntamente para determinar em qual tipo de projeto o uso do RCD tem os maiores benefícios ambientais (YAZDANBAKHSI *et al.* 2018).

Analisando os resíduos gerados pelas indústrias visitadas, foi observada a reutilização de corpos de prova para confecção de artefatos, como bancos, cercas, mesas, jardins, dentro da própria empresa. Parte dos resíduos desperdiçados durante o processo produtivo, ou na lavagem dos caminhões, assim como os corpos de prova inutilizados, são recolhidos por empresas para reutilização em aterramentos.

No entanto, outra parte dos resíduos do concreto, que não são recolhidos para reaproveitamento em aterros, ficam acumulados na indústria, expostos às intempéries, sem nenhum tratamento adequado do solo para evitar a contaminação. A falta de tratamento dos resíduos pode causar contaminação do solo, das águas (subterrâneas e superficiais) e do ar. A contaminação humana, por substâncias tóxicas, pode acontecer por ingestão, proveniente das emissões para água ou contato dérmico (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2015).

A emissão de substâncias químicas faz parte de todos os processos na produção de concretos, uma vez que estão presentes nos seus componentes/insumos. Os processos de mineração (areia e brita), que demandam queima de combustível para extração e explosão de rochas; a emissão de material particulado nos processos de transporte, mineração, produção de cimento e aditivos; além das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis para geração de energia, produção do cimento, diesel etc., contribuem, significativamente, para ecotoxicidade.

Não foi possível saber como a empresa que recolhe esses resíduos faz a utilização, se há preparação/tratamento do solo, a fim de evitar a contaminação, tanto do solo, como das águas (subterrâneas e rasas) e ar. Dependendo da destinação dada aos resíduos, eles podem continuar impactando o meio ambiente. Assim, a possibilidade de reciclar dentro da própria empresa parece ser uma alternativa para controlar o uso e destinação dos resíduos e evitar os possíveis

impactos que acontecem fora do sistema de produto analisado. Adquirir um triturador para esse fim pode promover o reaproveitamento dentro da indústria, sem a necessidade de transportar os resíduos, evitando, também os impactos relacionados ao transporte.

Para essas indústrias, o investimento em um triturador pode ser viável, pois o preço de mercado de um triturador de resíduos de construção civil gira em torno de R\$ 6.500,00 (Mercado Livre Brasil, 2021), valor que pode ser considerado baixo tendo em vista o faturamento de uma indústria concreteira do porte dos empreendimentos estudados (em torno de R\$ 8.300.000,00 anual) e o benefício advindo do reaproveitamento, tanto do ponto de vista ambiental, como econômico.

Os efluentes gerados são, parcialmente, captados para reaproveitamento dentro de uma das indústrias. O local de lavagem dos caminhões possui canaletas no chão que captam a água desperdiçada, conduzindo-a a um tanque onde é feito um processo simples de decantação para reaproveitamento do efluente, tanto na própria lavagem dos caminhões, maquinários e pátio da indústria, como para regar o jardim. Essa atitude deve ser adotada pelas outras empresas a fim de diminuir o impacto do desperdício de água que tem potencial para reaproveitamento.

Audo *et al.* (2018) calculam que, aproximadamente, 1.300 litros de água são utilizados na lavagem de cada caminhão. Existem estudos que afirmam que há viabilidade para o uso desse tipo de água residuária na produção do concreto, sem ocasionar perda de resistência ou alteração na sua trabalhabilidade (ASADOLLAHFARD *et al.*, 2015). No entanto, é preciso cautela na utilização de água de reuso para que a mesma não venha a comprometer a qualidade do concreto.

Em relação ao impacto do transporte, Goswein *et al.* (2018) estudaram um modelo que combina a ACV e a análise geoespacial do transporte rodoviário de materiais, para diminuir o seu impacto na produção de concreto. O método avalia o grau de importância da localização da oferta e demanda para a produção de concreto, em relação aos impactos ambientais. É fato que quanto mais próximos os insumos estiverem da indústria, menores serão os impactos com emissões atmosféricas e material particulado. No entanto, no contexto do tripé da sustentabilidade (ambiental, social e econômico), muitas vezes, para se ter ganhos em termos financeiros, é mais viável adquirir um insumo localizado em uma região mais distante para se poder ofertar um produto a um preço competitivo, desde que o custo com o frete seja compensatório.

Essas indústrias produzem um material que precisa ser consumido rapidamente, dada a sua estrutura e composição. Em função disso, o atendimento aos clientes não pode acontecer em distâncias muito grandes. As empresas visitadas atendem em um raio máximo de 150 km,

o que reduz o impacto global do produto, tendo em vista que os caminhões percorrem uma distância significativamente, menor, quando comparada à distância percorrida pelos aditivos (1.200 km) e cimento (1.150 km) até chegar à indústria. Há um distribuidor de aditivos localizado à 600 km de Teresina e uma fábrica de cimento a 400 km de distância. Assim, a possibilidade de adquirir produtos de fornecedores mais próximos pode contribuir com a redução do impacto do transporte.

Portanto, indústrias produtoras de concreto têm potencial para contribuir com a implementação de uma economia mais próxima da circular, tanto reutilizando seus próprios resíduos e efluentes, como utilizando resíduos de outras indústrias, que podem ser incorporados na composição do concreto, como na substituição de produtos do cimento e da sílica ativa, por outros produtos cimentícios provenientes dos resíduos, em uma colaboração mútua, promovendo ganhos ambientais, econômicos e sociais.

6.5 Conclusão

Os resultados obtidos nas categorias selecionadas para análise, com base na indicação feita na norma EN 15804 (ES, 2019), foram bastante próximos aos valores encontrados por Silva *et al.* (2020b), que desenvolveram um estudo semelhante (mesma unidade funcional, conjunto de dados similar, mesmo método de AICV) em concreteiras brasileiras. Os achados fortalecem as iniciativas e reforçam a necessidade da criação de um banco de dados brasileiro de ACV.

Na comparação entre os métodos (CML e ReCiPe) foi possível perceber que os resultados das categorias de impacto, comuns às duas metodologias, são bastante semelhantes, com exceção à ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana. As categorias com abrangência geográfica global, para ambos os métodos, tiveram seus valores potenciais de impacto mais próximos do que as categorias, que no método ReCiPe, possuem abrangência regional. A semelhança significa que ambos os métodos são apropriados para avaliação de impactos em estudos desenvolvidos no Brasil, mesmo com abrangência e fatores de caracterização diferentes (próprios de cada método).

Não foram encontrados estudos de ACV que abordam a produção de concreto e a categoria toxicidade humana sob a mesma perspectiva dessa pesquisa. Os trabalhos desenvolvidos no Brasil, com esse foco, não avaliam os potenciais impactos para a toxicidade humana na produção de concreto, em indústrias brasileiras, possivelmente, devido ao alto coeficiente de variação dessa categoria de impacto. Isto reforça a necessidade de

aprofundar a construção de base de dados primários, com maior qualidade, para reduzir incertezas. Uma das opções para reduzir as incertezas é ampliar a fronteira do sistema para berço ao túmulo, com a modelagem de dados primários que representem melhor a realidade da área em estudo. Na versão do Ecoinvent, utilizada nesse estudo (Ecoinvent 3.7.1), muitos dados são regionalizados para o Brasil, o que ajuda a reduzir as incertezas.

Os processos que mais contribuíram para a potencialização dos impactos foram a produção de cimento e a produção de sílica ativa. Existem outros tipos de cimento que consomem menos energia (Portland CP-III, por exemplo) para sua produção e produtos cimentícios que podem ser utilizados para diminuir o teor de cimento no traço do concreto e, também, no lugar da sílica ativa e essa possibilidade deve ser avaliada tendo em vista a contribuição desses processos no impacto das indústrias estudadas. A exequibilidade de tal substituição precisa ser adequadamente estudadas para que não afetem a segurança e a economicidade, sem ganhos expressivos de melhores indicadores ambientais

Além desses, outro processo que contribuiu no impacto do ciclo de vida do concreto é a destinação e tratamento dos resíduos. Assim, torna-se importante adotar métodos de reciclagem e reaproveitamento, quando viável, a fim de diminuir a incidências de resíduos. O transporte, também, impacta esse setor. Os resultados reforçam a afirmação do estudo de Silva *et al.* (2020b), sobre a variabilidade de fornecedores, no âmbito do Brasil. No caso das indústrias estudadas há possibilidade de adquirir insumos em localidades mais próximas, o que reduz o impacto das emissões atmosféricas provenientes do transporte.

É possível aprimorar a GCV do concreto dentro e fora do sistema de produto. Para isto é necessário sempre mais pesquisa e dados locais. As ferramentas teóricas já existem, como demonstrado nesse trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEPI ((Edital FAPEPI / MCT/ CNPq N° 007/2018 - Programa de Infra-Estrutura para Jovens Pesquisadores / Programa Primeiros Projetos - PPP) e ao CNPq pelo financiamento dos projetos de pesquisa [401320/2016-2] e [422087/2018-1] e o pesquisador JMMN agradece ao CNPq pelo financiamento através da Bolsa de Produtividade em Pesquisa [307215/2015-6].

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2005. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2005

_____. NBR ISO 14040: **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR ISO 14044: **Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. NBR 11768:2011. **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2011

_____. NBR 7212:2012. **Execução do concreto dosado em central - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

ACERO, A.P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. **LCA methods**. Green Delta. Version 1.5.5. 2016. Disponível em <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/11/LCIA-METHODS-v.1.5.5.pdf>. Acesso em 15 abr 2021.

ACV-IBICT. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2020. Disponível em: http://ontologia.acv.ibict.br/data/M3_toxicidade_humana_oacv.html#M3_toxicidade_humana_unep. Acesso em 10 abr 2021.

ASADOLLAHFARDI, G.; ASADI, M., JAFARI, H.; MORADI, A.; ASADOLLAHFARDI, R. Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 305-314, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL – ABESC. Manual do concreto dosado em central. 2007. Disponível em: <http://www.abesc.org.br/assets/files/manual-cdc.pdf>. Acesso em 06 abr 2021.

AUDO, M.; MAHIEUX, P. Y.; TURCRY, P. H.; CHATEAU, L.; CHURLAUD, C. Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 153-161, 2018.

BARRETO, L. P. G. L. **O estudo da água real e virtual no concreto usinado**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

BOLIM, C. A.; SMITH, S. T. Life cycle assessment of pentachlorophenol-treated wooden utility poles with comparisons to steel and concrete utility poles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2475–2486, 2011.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014.

BRAGAGNOLO, L.; KORF, E. P. Aplicação de resíduos na fabricação de concreto: como técnicas analíticas de caracterização podem auxiliar na escolha preliminar do material mais adequado? **Revista Matéria**, v.25, n.1, p. 1-15, 2020.

BRAGANÇA, L.; VIEIRA, S. M.; ANDRADE, J. B. Early stage design decisions: the way to achieve sustainable buildings at lower costs. **The Scientific World Journal**, v.14, pp. 1-8, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 307**, de 05 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em 01 abr 2021.

BS EN 15978:2011. **Sustainability of construction works** — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. European Committee for Standardization. 64 p. 2011.

BS EN 15804:2019. **Sustainability of construction works** — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardization. 72 p. 2019.

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

CABEZAS, J.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, T.; GÓMEZ-GALÁN, J. A.; CIFUENTES, H.; CARVAJA, R. G. Compact Embedded Wireless Sensor-Based Monitoring of Concrete Curing. **Sensors**, v. 18, n. 876, p. 2-17, 2018.

CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para blocos de concreto e diferentes argamassas. **Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 2, n. 2, p. 34-61, 2018.

CIMENTO.ORG. O mundo do cimento. 2021. Disponível em: <https://cimento.org/cp-ii-e-32-cimento-portland-composto-com-escoria/>. Acesso em 16 abr 2021.

COELHO, A.; BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 338-352, 2013.

COSTA, C. R.; OLIVI, P.; BOTTA, C. M. R.; ESPINDOLA, E. L. G. A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química Nova**, v. 31, n. 7, p. 1820-1830, 2008.

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, n. 2, p.191-210, 2019.

DE PAULA, R. R.; CALDAS, L. R.; PAIVA, R. L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do ciclo de vida de argamassas com resíduos de cerâmica vermelha considerando um indicador de

desempenho mecânico durabilidade. In: Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, 2018, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: IBICT, 2018. p. 979-985.

DE SCHEPPER, M.; VAN DEN HEEDE, P.; VAN DRIESSCHE, I.; DE BELIE, N. Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. **Materials**, v. 7, n. 8, p.6010-6027, 2014.

DUARTE, M. H. L.; SOUSA-LIMA, R. S.; YOUNG, R. J.; FARINA, A.; VASCONCELOS, M.; RODRIGUES, M.; PIERETTI, N. The impact of noise from open-cast mining on Atlantic forest biophony. **Biological Conservation**, v. 191, p. 623-631, 2015.

DUQUE, E. P. Aditivos para concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. v. 07, p. 14-24, 2018.

DURÃO, V.; SILVESTRE, J. D.; MATEUS, R.; BRITO, J. Assessment and communication of the environmental performance of construction products in Europe: Comparison between PEF and EN 15804 compliant EPD schemes. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 156, pp. 1-11, 2020.

ECOINVENT. New Data in Ecoinvent 3.7.1. 2021. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-37/new-data-in-ecoinvent-37/new-data-in-ecoinvent-37.html> Acesso em 10 abr 2021.

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 3, p. 23-40, 2010.

FEDERACIÓN IBEROAMERICANA DE HORMIGÓN PREMESCLADO - FIHP, 2021. Disponível em: <http://50.62.246.101/index.html>. Acesso em 08 abr 2021.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balanço das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. **Revista IBRACON de Estrutura e Materiais**, v. 11, n.1, p. 149-162, 2018.

FERREIRA, G. C.; SHIROMA, L.; BERALDO, A. L. OSPINA, M. T. Caracterização de resíduos da reciclagem de postes de concreto e sua utilização na fabricação de pisos intertravados. In: II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2016. **Anais...** João Pessoa: 2016. p.1-13.

FIORI, S.; CYBIS, L. F. A.; FERNANDES, V. M. F. Metodologia ACV para caracterizar impactos ambientais relacionados a diferentes cenários de uso de água em edificações. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n.4, pp. 186-194, 2014.

GOEDKOOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; ZELM, R. 2013. **ReCiPe 2008**. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Disponível em: https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf. Acesso em 05 mar 2020.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJE, L. 2016. **Introduction to LCA with SimaPro**. Disponível em: <https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>. Acesso em 17 abr 2021.

GOSWEIN, V.; GONÇALVES, A. B.; SILVESTRE, J. D.; FREIRE, F.; HABERT, G. KURDA, R. Transportation matters – Does it? GIS-based comparative environmental assessment of concrete mixes with cement, fly ash, natural and recycled aggregates, **Resources, Conservation and Recycling**, v. 137, p. 1-10, 2018.

GREGORY, J. R.; MONTALBO, T. M.; KIRCHAIN, R. E. Analyzing uncertainty in a comparative life cycle assessment of hand drying systems. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 8, p. 1605-1617, 2013.

HACKENHAAR, I. C.; WASKOW R. P.; TUBINO R.; PASSUELLO A. Life Cycle Assessment applied to construction and demolition waste treatment: proposal of a Brazilian scenario. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, p. 1-10, 2019.

HAUSCHILD, M. Z.; GOEDKOOP, M.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; JOLLIET, O.; MARGNI, M.; SCHRYVER, A. D.; HUMBERT, S.; LAURENT, A.; SALA, S.; PANT, R. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 683-697, 2013.

HAWKINS, D; MUMOVIC, D. Evaluation of life cycle carbon impacts for higher education building redevelopment: a multiple case study approach **Energy and Buildings**, v. 150, n. 1 pp. 507-515, 2017.

HEIJUNGS, R. On the number of Monte Carlo runs in comparative probabilistic LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 394–402, 2020.

HUIJBREGTS; M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M. D. M.; HOLLANDER, A.; ZIJP, M.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2016 v 1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. National Institute for Public Health and the Environment, 2017, 201p.

IBRACON. Instituto Brasileiro do Concreto. **Publicações**. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf. Acesso em 20 abr 2021.

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

IPCC- The Intergovernmental Panel on Climate Change. **Documentation**. 2020. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/documentation/> Acesso em 31 mar 2021.

JOSA, R.; JORBA, M.; VALLEJO, V. R. Opencast mine restoration in a Mediterranean semi-arid environment: Failure of some common practices. **Ecological Engineering**, v. 42, p. 183–191, 2012.

- KABIR, S.; AL-SHAYEB, A.; KHAN, I. M. Recycled Construction Debris as Concrete Aggregate for Sustainable Construction Materials. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 1518-1525, 2016.
- KIM, T. H.; TAE, S. H. Proposal of Environmental Impact Assessment Method for Concrete in South Korea: An Application in LCA (Life Cycle Assessment). **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 13, p. 1-16. 2016.
- LARUCCIA, M. M. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **Eniac Pesquisa**, v. 3, n. 1, p.69-84, 2014.
- LEITE, F. R.; ANTUNES, M. L. P.; SILVA, D. A. L.; OLIVEIRA, P. S. Avaliação do ciclo de vida da produção de argamassas com resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). In: Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, 2018, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: IBICT, 2018. p. 567-571.
- LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2ª Edição/Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.
- MAPA DA OBRA. Paredes de concreto moldadas in loco: vantagens e desvantagens. 2013. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/parede-de-concreto-in-loco/>. Acesso em 07 abr 2021.
- MASCIA, N. T.; SARTORTI, A. L. Identification and analysis of pathologies in bridges of urban and rural roads. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 26, n. 1, p. 5-24, 2011.
- MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75-96, 2012.
- MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 365-385, 2018
- MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 125-139, 2017.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2º Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- 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.
- Mercado Livre Brasil, (2021). Disponível em <https://www.mercadolivre.com.br/>. Acesso em 11 ago 2021
- MILISA, M.; ZIVKOVIC, V.; HABDIJA, I. Destructive effect of quarry effluent on life in a mountain stream. **Biologia**, v. 65, n. 3, p. 520—526, 2010.

- MOLIN FILHO, R. G. D.; LONGHI, D. A.; SOUZA, R. C. T.; VANDERLEI, R. D.; PARAISO, P. R.; JORGE, L. M. M. Study of the compressive and tensile strengths of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 4, p. 874-883, 2019.
- MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A. Environmental licensing in Brazilian's crushed stone industries. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 71, p. 49–59, 2018.
- MORALES, M. F. D.; REGULY, N.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELLO, A. C. Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 1-11.
- MURESAN, G. A.; GLIGOR, V. The mining risks and the landscape impact on the regional system of the Apuseni Mountains. **Riscuri și Catastrofe**, v. 16, n. 14, p. 117-130, 2015.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo. Bookman Editora. 2016. 887p.
- ONU. Organização das Nações Unidas. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2020. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em 20 mar 2021.
- OpenLCA. **Data**. 2020. Disponível em <https://www.openlca.org/lca-data/>. Acesso em 07 mar 2020.
- OZER, U.; KAHRIMAN A.; AKSOY M.; ADIGUZEL D.; KARADOGAN A. The analysis of ground vibrations induced by bench blasting at Akyol quarry and practical blasting charts. **Environmental Geology**, v. 54, p. 737–743, 2008.
- PASSUELO, A. C.; VENQUIARUTO, S.; ABREU, A. G.; ZANINI, C.; DOMINGUEZ, A. O.; KIRCHHEIM, A. P.; DAL MOLIN D, MASUERO, A. Valorização de resíduos de ágata em argamassas e concretos: avaliação do ciclo de vida. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, p. 1-13, 2019.
- PENG, X.; SHI, G. L.; ZHENG, J.; LIU, J. Y.; SHI, X. R.; XU, J.; FENG, Y. C. Influence of quarry mining dust on PM2.5 in a city adjacent to a limestone quarry: Seasonal characteristics and source contributions. **Science of the Total Environment**, v. 550, p. 940–949, 2016.
- PENTEADO, C. S. G.; ROSADO, L. P. Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 10, p. 1026-1035, 2016.
- PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 3, p. 222-240, 2012.
- POMPONI, F.; D'AMICO, B.; MONCASTER, A. M. A Method to Facilitate Uncertainty Analysis in LCAs of Buildings. **Energies**, v. 10, n. 4, p. 1-15, 2017.

PRADO, V.; WENDER, B. A.; SEAGER, T. P. Interpretation of comparative LCAs: external normalization and a method of mutual differences. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 2018–2029, 2017.

PRADO, V., CINELLI, M., TER HAAR, S.F. RAVIKUMAR, D.; HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J.; SEAGER, T. P. Sensitivity to weighting in life cycle impact assessment (LCIA). **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 2393-2406, 2019.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Database Manual**. Methods library. Version 4.14.2. 2019, 75p.

RIBAS, A. C. M.; ALMEIDA, F. S. B.; CLERISE, T. P. M.; TOCUNDUVA, M. V. C.; FREITAG, V. C. Evidenciação ambiental: estudo de caso aplicado a uma indústria de cimento. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 1, n. 2, p. 45-69, 2016.

SANTANA R. C.; Toledo Filho, R. D.; AMARIO, M.; PEPE, M.; POLISSENI, G. C.; ANDRADE, G. P. Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 589-601, 2019.

SCHEEREN, S. C. S.; SALUM, P. L.; KIRCHHEIM, A. P.; RODRÍGUEZ, E. D. Influência de aditivos superplastificantes a base de policarboxilato na resistência a compressão e propriedades no estado fresco de um cimento Portland tipo I. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v.4, n.2, p.129-14, 2017.

SILVA, F. B.; OLIEIRA, L. A.; YOSHIDA, O. S.; JOHN, V. M. Variability of environmental impact of ready-mix concrete: a case study for Brazil. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, p. 1-9, 2019.

SILVA, F. B.; REIS, D. C.; MACK-VERGARA, Y. L.; PESSOTO, L.; FENG H.; PACCA, S. A.; LASVAUX, S.; HABERT, G.; JOHN, V. M. Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. The **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 980–997, 2020a.

SILVA, F. B.; SAADE, M. R. M.; MORAGA, G. L.; YOSHIDA, O. S.; GOMES, V.; PASSUELO, A., OLIVEIRA, L. A.; SILVA, M. G.; JOHN, V. Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. **Concreto & Construções**, Ed. 98, p. 91-97, 2020b.

SILVA, F. B.; YOSHIDA, O. S.; ARDUIM, R. H.; VINHAL, L. D.; TEIXEIRA, C. E.; OLIVEIRA, L. A. Análise comparativa de procedimentos para a estimativa de incertezas em ACV: um estudo baseado na produção de blocos cerâmicos de alvenaria. **LALCA Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, Edição Especial V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, p. 63-77, 2016.

SILVA, F. B.; YOSHIDA, O. S.; DIESTELKAMP, E. D.; OLIVEIRA, L. A. Is it relevant to include capital goods in the life cycle assessment of construction products? In: VI Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, 2018, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: IBICT, 2018. p. 711-724.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. In: **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em 15 abr. 2021.

SOLEIMANI, M.; SHAHANDASHTI, M. Comparative process-based life-cycle assessment of bioconcrete and conventional concrete. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 15, n. 5, p. 667-688, 2017.

SOUZA, H. H. S. Avaliação do ciclo de vida e influência do tempo de vida útil dos postes de madeira e concreto do sistema de distribuição de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 159, 2014.

STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of cement: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1293-1299, 2016.

STEUBING, B.; WERNET, G.; REINHARD, J.; BAUER, C.; MORENO-RUIZ, E. The Ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 21, p. 1269-1281, 2016.

TABATABAEI, J.; MOHAMMADI, F. Environmental Effects of Mining Industries in Meymeh Region, North West of Isfahan. **APCBEE Procedia**, v.5, p. 388-393, 2013.

TEIXEIRA, E. R.; MATEUS, R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F. B. Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 195-207, 2019.

TOL, R. S. J. New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part I: Benchmark Estimates. **Environmental and Resource Economics**, v. 21, n. 1, p. 47-73.

UBAQUE, C. A. G.; VACA, M. C. G.; RODRÍGUES, C. F. A. Evaluación y diagnóstico de passivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. **Tecnura**, v. 18, n. 42, p. 90-102, 2014.

UGAYA, C. M. L.; ALMEIDA NETO, J. A.; FIGUEIREDO, M. C. B. Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro/RAICV. Brasília: IBICT. 2019, 165 p.

VAN DEN HEEDE, P.; BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 431-442, 2012.

VIEIRA, L. B. P.; FIGUEIREDO, A. D. Resíduos da concreteira: o aproveitamento do problema. **Revista Concreto e Construções IBRACON**, v. 71, p. 49-53, 2013.

VLADMIROV, V.; BICA, I. Methodology and calculation model for recycling of composite construction products. **E3S Web of Conferences**, v. 85, pp. 1-7, 2019.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER R, MUTEL C, NEMECEK T, REINHARD J, VADENBO C O, WERNET G. Overview and methodology: Data quality guideline for the Ecoinvent database version 3 **Ecoinvent Report**, v. 3, n. 1, 2013. 169p.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part D): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016.

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

7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL EM INDÚSTRIAS QUE FABRICAM POSTES DE CONCRETO ARMADO¹¹

Resumo

As empresas que fabricam postes (estruturas pré-moldadas de concreto armado) disponibilizam a infraestrutura necessária para sustentação de redes aéreas de distribuição de energia elétrica, iluminação pública, entre outras finalidades. Essas indústrias geram diversos impactos ambientais negativos, cuja extensão precisa ser avaliada a fim de se encontrar meios para a sua mitigação. Nesse trabalho utilizou-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como metodologia para medir os potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos postes, adotando-se o método CML (*baseline*). Foram coletados dados primários (quantidade de cimento, brita, areia, vergalhões de aço, energia, água) de quatro indústrias localizadas em Teresina, Piauí, Brasil, e utilizadas informações da base de dados Ecoinvent 3.7.1 (transporte, resíduos sólidos, efluentes líquidos, material particulado). Não foram encontrados, na literatura, estudos que abordem a produção de postes na mesma perspectiva dessa pesquisa, tornando esse trabalho relevante como um parâmetro de comparação sobre os potenciais impactos da produção de postes de concreto. Os estudos encontrados apontam uma tendência de correlação para indicadores de ecotoxicidade e toxicidade humana indicando a consistência para o cálculo da ACV, uma vez que foi utilizada uma quantidade expressiva de dados primários, gerando informações confiáveis para orientar a tomada de decisão, nesse setor. A disposição final dos resíduos se destaca como importante fonte de impactos para essas indústrias, confirmando a importância da gestão eficiente desses materiais no final da vida útil e no descarte durante o processo produtivo. Assim, o reaproveitamento de resíduos pode contribuir para a redução de extração de jazidas naturais em diversos processos produtivos relacionados ao ciclo de vida dos postes, além da redução do acúmulo dos mesmos no ambiente. A utilização de insumos provenientes de fornecedores mais próximos é uma estratégia que contribui com a mitigação do potencial impacto das emissões gasosas diminuindo o impacto que gera o aquecimento global e as mudanças climáticas.

Palavras-chave: Postes de concreto. Ciclo de Vida. Impacto ambientais.

Abstract

Companies that manufacture poles (precast reinforced concrete structures) provide the necessary infrastructure to support overhead electricity distribution networks, public lighting, among other purposes. These industries generate several negative environmental impacts, whose extent needs to be assessed in order to find ways to mitigate them. In this research, Life Cycle Assessment (LCA) was used as a methodology to measure the potential environmental impacts throughout the poles life cycle, adopting the CML (baseline) method. Primary data (amount of cement, gravel, sand, steel rebars, energy, water) were collected from industries located in Teresina, Piauí, Brazil, and information from the Ecoinvent 3.7.1 database (transport, solid waste, liquid effluents, particulate matter) was used. No studies were found in the literature that address the pole production in the same perspective as this research, making this study relevant as a comparison parameter on the potential impacts of the concrete poles production. However, the literature points to a correlation trend for ecotoxicity and human toxicity indicators, as well as the results found in this research, indicating consistency for the calculation of LCA, since an expressive amount of primary data was used generating reliable information to guide decision making in this sector. The waste disposal stands out as an

¹¹ Artigo submetido ao periódico *The International Journal of Life Cycle Assessment* em 18/05/2021. Em 19/07/2021 o status do mesmo é "em avaliação"

important source of impacts for these industries, confirming the necessity of efficient management of these materials at the end of their lifespan and during the production process. The reuse of waste within the industry itself is feasible (using a shredder for this purpose) and can contribute to decrease the extraction of natural deposits in various production processes related to the poles life cycle, in addition to reducing their accumulation in the environment. The use of inputs from closer suppliers is a strategy that contributes to mitigate the potential impact of gaseous emissions, reducing the impact that generates global warming and climate change.

Keywords: Concrete pole. Life cycle. Environmental impact.

7.1 Introdução

A produção de estruturas pré-moldadas de concreto armado para sustentação de redes aéreas de distribuição de energia elétrica, iluminação pública, entre outras finalidades (postes), é uma prática amplamente utilizada em todo o mundo. As empresas que fabricam postes estão inseridas no setor da construção civil, disponibilizando, assim, a infraestrutura necessária ao acesso à energia elétrica.

Dentre os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), lançados pela Organização das Nações Unidas (ONU), em 2015, está o ODS 7, relativo ao acesso à energia. O atendimento a esse ODS, pelas indústrias desse setor, vai ao encontro do cumprimento da agenda 2030, cujo propósito é estabelecer um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade, em prol do desenvolvimento sustentável (ONU, 2020).

O processo de fabricação de postes causa diversos impactos socioambientais e econômicos. Os impactos positivos em relação ao benefício social desse produto estão relacionados à sua utilização, principalmente, para distribuição de energia elétrica e iluminação de vias públicas, uma vez que a sociedade usa esses recursos cotidianamente (CAMPOS; ELMIRO; NÓBREGA, 2014). Um exemplo de impacto positivo indireto que pode ser citado em virtude da iluminação de vias públicas é a diminuição, ou inibição, da violência. Ruas bem iluminadas tendem a diminuir a incidência de atos violentos, devido à exposição que a iluminação permite.

Dentre os impactos econômicos, comuns aos mais diversos setores econômico/industriais tem-se a geração de empregos (LU; HANANDEH, 2016). Uma particularidade das indústrias de produção de postes é a quantidade de funcionários, quando comparadas a outras empresas da construção civil, como as concreteiras, por exemplo, uma vez que são necessárias, no mínimo, duas equipes para a fabricação desse material: um grupo de montadores da estrutura de vergalhões de aço e outro para a produção do concreto, que devem

trabalhar concomitantemente na produção dos postes. Além disso, quando a indústria opera com frota própria, é necessária a equipe de instalação de redes de distribuição e motoristas,

Os impactos ambientais negativos estão relacionados, principalmente, com a interferência na paisagem, causada pela instalação das redes de transmissão de energia. Campos, Elmiro e Nóbrega (2014) sugerem o uso de Geoprocessamento e Análise da Paisagem como ferramentas para indicação dos locais de preferência para instalação destes empreendimentos, a fim de reduzir os impactos causados. Uma forma de minimizar o impacto na paisagem é a utilização de redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica (GOUVEIA; COSSI, 2013; CAMPOS; MACEDO; LOPES, 2019). É um mecanismo que resolve o problema do impacto visual, porém causa outros danos, relacionados ao solo, além de outros problemas relativos a obras espalhadas pela cidade. Nenhuma solução proposta para reduzir impactos prescinde de análise técnica e econômica para o caso concreto em análise.

Alguns impactos negativos comuns ao setor da construção civil, onde estão inseridas essas indústrias são: emissões atmosféricas, geração de material particulado e ruído, supressão da vegetação para a construção da indústria, produção de resíduos e efluentes, entre outros (INGRAO *et al.*, 2014). Além desses, existem os impactos desde a extração da matéria-prima, como areia e brita, até as emissões de combustível no trajeto da entrega do material ao consumidor final (KIM; TAE, 2016). Todos esses impactos devem ser considerados ao se fazer a análise do desempenho ambiental de um produto.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das metodologias que possibilita a identificação e mensuração de todos os impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços, ao longo do seu ciclo de vida. Os impactos são avaliados desde a aquisição da matéria-prima, passando pela produção, pelo uso e pela disposição final (ABNT, 2014). Essa técnica é regulamentada pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014a), podendo ser utilizada para subsidiar a identificação de oportunidades de melhoria do desempenho de produtos do ponto de vista ambiental, econômico e social.

Para o setor da construção civil, existem, ainda, duas normas europeias para orientar a aplicação da ACV. A EN 15978 especifica o método de cálculo para avaliar o desempenho ambiental de um edifício e fornece os meios para comunicar o resultado da ACV (BS, 2011). A EN 15804 fornece regras de categoria básicas para produtos e serviços de construção, além de uma estrutura para garantir que todas as Declarações Ambientais de Produto (DAPs) de produtos, serviços e processos de construção sejam derivadas, verificadas e apresentadas de forma harmonizada, a fim de possibilitar a comunicação de informações ambientais verificáveis, apoiando escolhas justas, com base científica, estimulando o potencial de melhoria

ambiental contínua (BS, 2019). Além das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014a) que regulamentam o uso da ACV, esse estudo foi baseado nas normas europeias EN 15978 (BS, 2011) e EN 15804 (BS, 2019) devido à aplicação das mesmas a materiais e produtos da construção civil

No setor da produção de postes, a ACV é usada para auxiliar a tomada de decisão entre materiais alternativos e inovadores, por exemplo. Segundo Lu e Hanandeh (2016), o poste de concreto é a opção mais impactante do ponto de vista ambiental e do custo do ciclo de vida, quando comparado à postes de madeira e aço, principalmente, pelo tipo de recursos materiais utilizados e pelo seu peso elevado, que exigem mais energia durante a fabricação e o transporte.

O estudo desenvolvido por Bolim e Smith (2011) também demonstrou que postes de madeira são menos impactantes que os postes de aço e concreto, em diversas categorias, promovendo menor uso de combustíveis fósseis e água. No entanto, em relação às emissões com potencial de gerar poluição atmosférica, são mais impactantes. Um estudo de ACV deve considerar a situação local, possibilidades tecnológicas etc., uma vez que o resultado obtido em determinado país pode diferir do resultado no Brasil.

A vida útil e durabilidade, também, variam dependendo do material, especialmente, quando considerada a inspeção manutenção adequadas dos postes, que podem aumentar em até 10 anos (BOLIM; SMITH, 2011). O aumento da vida útil implica, diretamente, na redução dos impactos ambientais gerados na produção de postes. De acordo com Souza *et al.* (2017), a ACV indicou que, para ambos os tipos de postes (madeira e concreto), existe a possibilidade de redução de impactos à proporção em que a sua vida útil aumenta.

Assim, a ACV é uma ferramenta que possibilita a avaliação dos impactos ambientais de todo o ciclo de vida desses produtos, em diferentes cenários, possibilitando a escolha por processos produtivos e materiais menos impactantes ao meio ambiente. A importância desse estudo se dá à medida que existem poucos estudos de ACV sobre postes de concreto, com coleta e uso de dados primários, o que torna relevante a análise dos impactos ambientais, econômicos e social causados pela produção de postes.

7.1.1 Controle de qualidade na fabricação de postes

As indústrias que fabricam postes estão vinculadas às seguintes entidades: *Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto* (ABCIC), Associação Brasileira de Engenharia Industrial (ABEI), Associação Brasileira de Logística e Transporte de Cargas (ABTC), Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento (SINPROCIM) e Sindicato

da Indústria da Construção Civil (SINDUSCON). Esses sindicatos e entidades regulamentam o mercado desse setor para que haja padrão na fabricação e comercialização dos produtos (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP, 2019).

Para garantir o controle de qualidade dos postes, existem normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que regulamentam a sua fabricação e utilização (Apêndice B). A necessidade de um padrão de qualidade para esse setor se dá por ser um material aplicado à distribuição de energia que pode sofrer deformidades em sua estrutura, devido, por exemplo, à deficiência no processo de cura¹², causando acidentes. Além disso, há outras causas que provocam defeitos estruturais: baixo consumo de cimento por m³ de concreto, espaço inadequado entre as ferragens e a fôrma, expondo a armadura às intempéries; descuido com a qualidade do agregado; entre outras (ROBERTS; LEES; HOULT, 2017).

As normas da ABNT estabelecem as diretrizes tanto para a produção dos postes, como para a instalação das redes de distribuição de energia elétrica, garantindo a confiabilidade e qualidade dos mesmos. São estabelecidas, também, as conformidades para a produção do concreto, determinação do tempo de cura, padronização de ensaios destrutivos, entre outros. Assim, é possível combater as manifestações patológicas mais comuns a esse tipo de produto, como ataques químicos, abrasão e outras reações do agregado que agredem as armaduras e provocam a deterioração dos vergalhões (FUJIMOTO; HIGASHI; SAWADA, 2015), além de prolongar a vida útil em função do desgaste natural provocado pelas intempéries, adiando a substituição dos mesmos (YUAN; JIANG, 2012; TSUNEMOTO *et al.*, 2017).

Segundo Tsunemoto *et al.* (2017), o aparecimento natural de fissuras é o processo mais comum de deterioração de postes e a substituição deve ser feita, somente, após inspeção visual, testes de carbonatação e testes de resistência, que podem constatar a necessidade de reforço e, não necessariamente, a sua substituição. O estudo desenvolvido por Cerqueira *et al.* (2012), sobre a taxa de corrosão e de estrutura de concreto submetidas a diferentes condições climáticas (sul e nordeste do Brasil) demonstrou que o processo de deterioração acontece de maneira diferente em função do ambiente, o que leva à necessidade de observância cuidadosa aos padrões estabelecidos nas normas que regulamentam a produção de postes e podem influenciar as escolhas para a ACV como, por exemplo, qual vida útil adotar.

¹² A cura do concreto, é nome dado ao processo técnico utilizado para desacelerar a evaporação da água utilizada na sua fabricação e permitir a completa hidratação do cimento. Tradicionalmente, para o concreto convencional, é considerado um limite de 3 dias para a cura, 7 dias para o endurecimento e 28 dias para o desenvolvimento da resistência. (CABEZAS *et al.*, 2018). A finalidade de uma cura é garantir que o concreto atinja as condições projetadas de carga.

O atendimento aos padrões de qualidade pode contribuir para melhorar a resistência dos postes, também, em situações extremas: condições de fortes ventos, como os tornados (IBRAHIM; DAMATY; ANSARY, 2017), e vibrações, como terremotos (CHEN; DAI, 2010). Assim, é importante atentar para o controle de qualidade dos postes a fim de garantir sua utilização correta, prolongamento da sua vida útil, contribuindo para a diminuição dos impactos ambientais causados pelos mesmos.

7.2 Metodologia

Foram realizadas visitas à quatro indústrias de fabricação de postes, localizadas em Teresina-PI, com o objetivo de acompanhar o processo produtivo desse material, bem como colher dados por meio de entrevistas com os gestores/engenheiros responsáveis pelas empresas. Conforme o Termo de Confidencialidade firmado entre pesquisador/indústria, as mesmas não serão nomeadas, sendo caracterizadas como A, B, C e D.

Foram elaborados questionários, contemplando todas as informações necessárias para a construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), o qual visa identificar todas as entradas e saídas de um processo produtivo. No universo de dados primários constam: quantidade e tipo de insumos utilizados, consumo de combustível, energia e água; descrição de máquinas e equipamentos; quantidade e tipo de resíduos produzidos; traço do concreto; entre outros. Os dados secundários foram obtidos na literatura científica e em relatórios especializados do setor.

7.2.1 Definição do objetivo, escopo e unidade funcional

O objetivo desse estudo foi realizar a ACV da produção de um poste do tipo Duplo T, cujas especificações técnicas e dimensionais estão descritas na norma ABNT NBR 8451-1 (BRASIL, 2011), utilizado para sustentação de redes de distribuição de energia elétrica. Para essa finalidade, a coleta de dados foi feita de forma agregada, isto é, os insumos foram contabilizados como um todo, para a caracterização do desempenho ambiental do produto. O público-alvo desse trabalho são as indústrias de pré-moldados que fabricam postes, empresas de distribuição de energia elétrica e os demais interessados, no setor da construção civil, bem como a comunidade acadêmica. A função do produto fabricado nas indústrias pesquisadas (postes) é abastecer o mercado de distribuição de energia elétrica, em Teresina-PI, em nível local e regional.

A unidade funcional definida foi um poste do tipo Duplo T, de 10 m de altura, carga nominal de 400 daN e, aproximadamente, 900 kg. O fluxo de referência consiste na quantidade total dos materiais necessários para atender a produção de 1.750 postes por mês, considerando a produção média diária de 70 unidades desse tipo de poste (25 dias), que representa, aproximadamente, 44 km de rede de distribuição de energia, tendo em vista a distância média de 40 m entre os postes, conforme estabelecido na Norma NBR 15668 (ABNT, 2013), correspondendo à 1.575 toneladas de produto acabado (900 kg X 1.750 postes).

Quanto à cobertura temporal, a coleta de dados teve como referência o ano de 2018 e 2019. Quanto à cobertura geográfica, o estudo foi realizado em quatro indústrias de fabricação de postes localizada em Teresina, estado do Piauí, na região Nordeste do Brasil. Em relação à cobertura tecnológica, refere-se ao processo produtivo comumente utilizado em fabricação de estruturas pré-moldadas de concreto armado brasileiras (MILANI *et al.*, 2012).

A coleta de dados abrangeu fontes primárias, coletadas em campo, e fontes secundárias, obtidas na literatura científica e em relatórios especializados do setor. Os dados de entrada de insumos para a fabricação dos postes não foram considerados estimados, uma vez que as indústrias forneceram dados contabilizados nos sistemas de registro das empresas.

Os dados estimados são aqueles relativos aos resíduos de concreto, vergalhões e volume de efluentes (saídas do sistema), desperdiçados durante o processo produtivo, e a distância percorrida para o fornecimento dos insumos, uma vez que os mesmos podem ser adquiridos em diferentes empresas, dependendo de facilidades como descontos no preço dos produtos, por exemplo. Também, foram estimados: a distância percorrida pelos caminhões para movimentação interna de material e a quantidade de água para umidificação dos postes e consumo interno da indústria (escritório, refeitório e instalações). É válido salientar que a água utilizada na fabricação do poste (mistura do concreto) não foi estimada.

O desmoldante utilizado é uma mistura de um produto da marca Hagen, tipo C, que consiste em uma composição de ácido carboxílico diluído em hidrocarboneto com óleo queimado, adquirido em oficinas. A proporção de utilização desse produto é de 10% para 90% de óleo queimado, o que representa menos de 0,1% dos insumos utilizados para a fabricação de cada poste. Foi feita a modelagem com, e sem, a presença do produto, cujas análises demonstraram não haver alteração no resultado final para as categorias de impacto selecionadas. Assim, a modelagem foi feita considerando 100% de óleo queimado como desmoldante.

A fronteira do sistema analisado é *cradle to gate*, isto é, do berço a portão da atividade industrial, acrescido, a montante, o transporte de insumos até a indústria. A etapa de transporte para o consumidor final não pôde ser verificada uma vez que a maior parte da entrega é feita

em Teresina e região com frota terceirizada. Assim, não foi possível obter, de nenhuma das empresas visitadas, o consumo de diesel, bem como as distâncias percorridas, para efetuar a entrega e instalação dos postes.

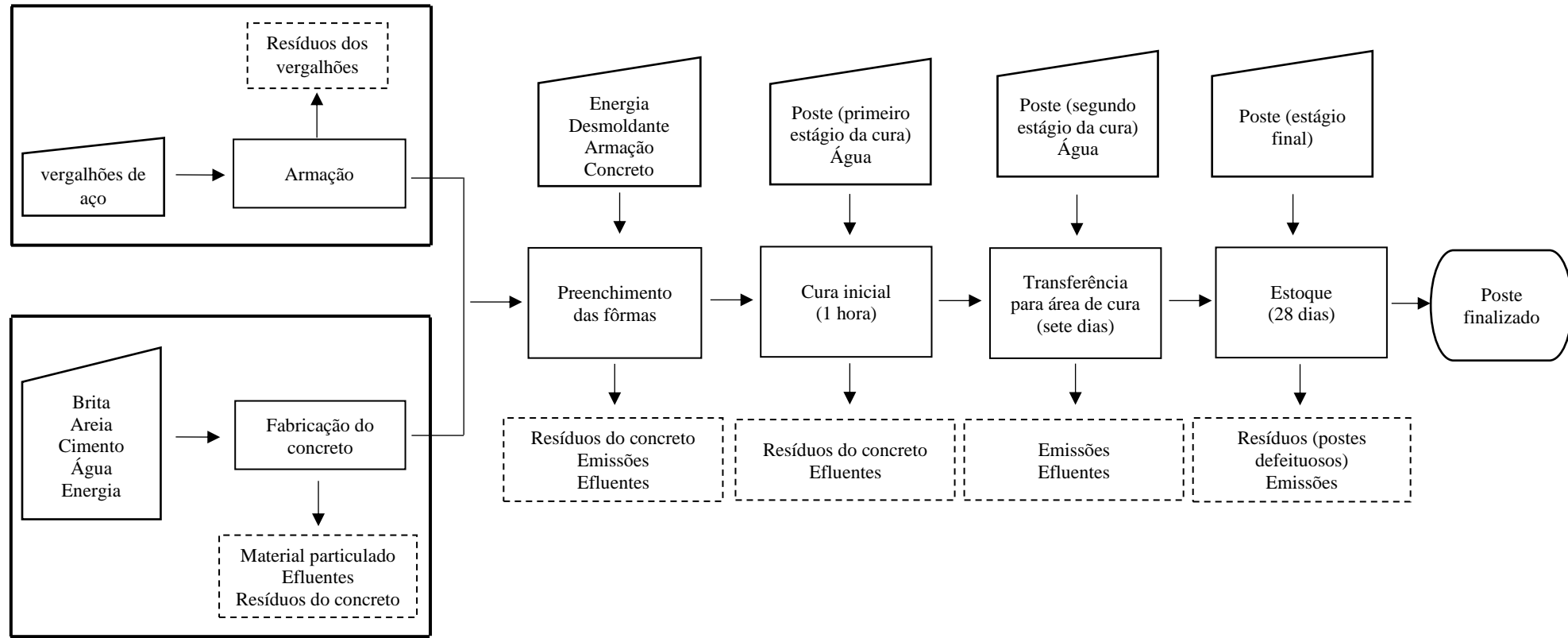
As etapas verificadas foram: chegada e armazenamento dos insumos, o processo de montagem da estrutura de vergalhões de aço, mistura e dosagem para a produção do concreto (traço do concreto), preenchimentos das fôrmas, processo de cura, estocagem do produto final e disposição de resíduos. O fluxograma do processo de fabricação de postes está descrito na Figura 1.

Foi utilizado o OpenLCA 1.8, *software* gratuito, de código aberto, utilizado para análises de ACV (OpenLCA, 2020). A base de dados usada foi o Ecoinvent 3.7.1 Cut-Off unit regionalized. O método adotado para a AICV foi o CML (*baseline*), que apresenta as seguintes categorias de impacto: depleção da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, de água doce e marinha, depleção de recursos abióticos (fósseis e minerais), eutrofização, oxidação fotoquímica (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2016).

Das categorias apresentadas pelo método CML, apenas, ecotoxicidade marinha não é indicada pela norma EN 15803:2019 e não será analisada nesse estudo. O método possui escopo de aplicação global para todas as categorias abordadas, com exceção para acidificação e formação de oxidantes fotoquímicos e é indicado por Mendes, Bueno e Ometto (2016) para utilização em estudos desenvolvidos no Brasil, por sua abrangência global de aplicação. Para o contexto brasileiro, é um dos métodos que mais têm sido utilizados em trabalhos recentes (anos 2019/2020), baseados na norma EN 15804:2019 (MORALES, *et al.*, 2019; PASSUELO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020b).

As categorias de impacto selecionadas para análise, nesse estudo, foram ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, aquecimento global, depleção de recursos abióticos (minerais e fósseis) e acidificação, uma vez que são as categorias que se apresentaram maior impacto, após a normalização, e pela natureza da atividade e do processo produtivo. Além disso, são as categorias que costumam se destacar, em estudos de ACV de postes de concreto (SOUZA *et al.*, 2017)

Figura 1 – Fluxograma do processo de produção de postes



Legenda:



Entradas do sistema



Etapas do processo



Etapas concomitantes



Saídas do sistema

7.2.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Após a definição do objetivo e escopo do estudo, foi realizada a etapa de ICV. Os dados referentes à entrada e saída de produtos foram contabilizados tendo em vista a produção de um poste do tipo Duplo T de 10 metros de altura, carga nominal de 400 daN, peso aproximado de 900 kg (unidade funcional). Os dados foram ajustados ao fluxo de referência, ou seja, a produção de 1.750 postes/mês.

A base de dados utilizada foi o Ecoinvent 3.7.1 *Cut-Off unit regionalized*. A versão 3.7 do banco de dados Ecoinvent apresenta mais de 900 conjuntos de dados novos e 1.000 atualizados, incluindo dados brasileiros. Como resultado dessa atualização, o cenário de dados Ecoinvent agora inclui mais 100 produtos, expandindo a cobertura do banco de dados. As atualizações e acréscimos da versão 3.7 são o resultado da participação da associação Ecoinvent em vários projetos e colaborações com associações em diferentes setores industriais em todo o mundo (ECOINVENT, 2021).

No modelo *Cut-Off* todas as trocas intermediárias (ou seja, trocas dentro da tecnosfera) são classificadas em "subprodutos alocáveis", "materiais recicláveis" ou "resíduos". A classificação é baseada no julgamento de especialistas sobre o valor de uma troca, potencial de uso e destino previsto (STEUBING *et al.*, 2016; WERNET *et al.*, 2016). O modelo foi utilizado em outros trabalhos desenvolvidos recentemente (anos 2019/2020), que envolvem produtos da construção civil, no contexto brasileiro (HACKENHAAR *et al.*, 2019; MORALES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020a).

Na Tabela 1 estão descritos os *inputs* e na Tabela 2 os *outputs* do inventário do ciclo de vida da produção de postes, de acordo com as escolhas feitas no banco de dados do Ecoinvent, para o sistema de produto estudado. A importância de relacionar as escolhas refere-se à reprodutibilidade e transparência do estudo.

Tabela 1 – Inventário do Ciclo de vida da produção de postes: fluxo de entrada (*Inputs*)

<i>Inputs</i>				
Fluxo	Quant.	Unid.	Provedor	Notas Pedigree
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	623.28	t*km	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW</i>	(4;4;1;1;2)
<i>tap water</i>	37.50	kg	<i>market for tap water tap water Cutoff, U - BR</i>	(2;2;1;1;2)
<i>Sand</i>	121.50	kg	<i>market for sand sand Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;3)
<i>reinforcing steel</i>	40.20	kg	<i>market for reinforcing steel reinforcing steel APOS, U – GLO</i>	(4;2;1;1;2)
<i>lubricating oil</i>	100	g	<i>market for lubricating oil lubricating oil APOS, U – RoW</i>	(2;2;1;1;2)
<i>gravel, crushed</i>	145.8	kg	<i>market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;4)
<i>electricity, medium voltage</i>	2.219	kWh	<i>electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-North-eastern grid</i>	(1;2;1;1;2)
<i>cement, Portland</i>	75.0	kg	<i>cement production, Portland cement, Portland Cutoff, U - BR</i>	(1;2;1;1;2)

Fonte: Autores

Tabela 2 – Inventário do Ciclo de vida da produção de postes: fluxo de saídas (*Outputs*)

<i>Outputs</i>				
Fluxo	Quant.	Unid.	Notas Pedigree	
<i>Pole</i>	1	Item(s)	(1;1;1;1;1)	
<i>Particulates, fine mineral fibers</i>	0.0750	g	(3;3;2;3;4)	
<i>Waste concrete</i>	9.0	kg	(4;2;1;3;2)	
<i>Waste reinforcement steel</i>	40.0	g	(3;3;2;3;4)	
<i>Wastewater from concrete production</i>	1.25140	kg	(3;3;2;4;4)	

Fonte: Autores

Para a tomada de decisão sobre a escolha dos *inputs*, disponíveis no banco de dados do Ecoinvent 3.7.1, foram consideradas as características do inventário do processo produtivo estudado. O conjunto de dados para o cimento descreve a produção de cimento Portland de alta resistência inicial no Brasil. Sua aplicação inclui concreto armado, artefatos de concreto, concreto protendido e pisos industriais. Para a areia, o conjunto de dados contém a produção de concreto para uso na construção civil. Este conjunto de dados descreve a produção brasileira de areia para aplicação em materiais de construção (ECOINVENT, 2021).

O conjunto de dados da brita descreve todo o processo de mineração em pedreiras. Esse conjunto de dados descreve a produção de brita, geralmente, aplicada em materiais de

construção, a partir de pedreiras de granito ou basalto, que representam o processo típico de extração de pedra no Brasil. O conjunto de dados da água descreve a água encanada disponível ao usuário, no Brasil. Essa atividade começa com água canalizada, sob pressão, na estação de tratamento e alimentada na rede de distribuição e termina com 1 kg de água no consumidor (industrial ou doméstico). O conjunto de dados da água inclui a rede de distribuição e as perdas de água durante a transmissão (ECOINVENT, 2021).

O conjunto de dados da energia elétrica inclui a produção de eletricidade na região nordeste do Brasil. Esta atividade começa com a eletricidade de média tensão chegando à estação transformadora e termina com 1 kWh de eletricidade de média tensão. Para o transporte, o conjunto de dados representa o serviço de transporte de carga de 1 t*km em um caminhão da classe de tamanho entre 16 e 32 toneladas métricas de peso bruto do veículo (GVW) e classe de emissões Euro IV (caminhões com mais de 6 anos de fabricação). Os conjuntos de dados de transporte se referem a todo o ciclo de vida do transporte (ECOINVENT, 2021).

Para os vergalhões de aço, o conjunto abrange os processos de fabricação para transformar um produto semimanufaturado em um produto final. Inclui a mistura de aços produzidos de maneira diferente e laminação a quente. O desmoldante utilizado está caracterizado no inventário de conjunto de dados de óleos lubrificantes usados em motores e inclui os materiais de entrada, usos de energia, infraestrutura e emissões (ECOINVENT, 2021).

Em relação aos *outputs* foram selecionados os fluxos correspondentes aos resíduos, efluentes e emissões de material particulado. O material particulado corresponde ao fluxo elementar de fibras minerais finas. O resíduo do concreto inclui a energia e emissões de partículas provenientes do desmantelamento e manuseio, o transporte para instalações de desmontagem e o descarte final. Para o resíduo de vergalhões de aço são incluídas a energia para desmontagem, máquinas para manuseio em usina de triagem, demanda de eletricidade por usina de triagem, transporte para instalações de desmontagem. O efluente refere-se à água residual típica proveniente da fabricação de concreto (ECOINVENT, 2021).

7.2.3 Estimativa de incerteza

A qualidade e representatividade dos dados são fundamentais em estudos de ACV. É importante que os fluxos declarados sejam fiéis ao sistema estudado e que seja declarada a sua incerteza, que pode ser dividida em três categorias: parâmetros, cenário e modelo (ABNT, 2014a; SILVA *et al.*, 2016). A incerteza de parâmetro está relacionada às entradas e saídas dos

processos e características tecnológicas. No presente trabalho foi possível calcular a incerteza pois trabalhou-se com dados primários de quatro indústrias. A variação de seus quantitativos no resultado final aponta as incertezas nos parâmetros, que correspondem a entradas/saídas das indústrias visitadas.

A incerteza de cenário envolve definições sobre a unidade funcional, horizontes de tempo e procedimentos de alocação, por exemplo. No caso em estudo, houve fixação do cenário inexistindo incerteza a ele relacionada. A incerteza de modelo inclui o cálculo dos indicadores na fase de avaliação de AICV. Após a escolha de determinado modelo de AICV (no caso, CML), o uso de banco de dados secundários traz a incerteza inerente a esses dados secundários.

Aplicou-se a Matriz Pedigree, que contabiliza, objetivamente, a qualidade dos dados, pela sua origem. As fontes de dados são avaliadas de acordo com cinco características independentes: confiabilidade, abrangência, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica. Os bancos de dados secundários utilizados já trazem as informações características e, portanto, suas próprias incertezas para a Matriz de Pedigree. Em qualquer trabalho de ACV onde há produção de uso de dados primários, como este, é necessário avaliar esta incerteza para que sejam adequadamente discutidos os resultados de ACV e, posteriormente, possam ser utilizados como banco de dados secundários em outros trabalhos.

A análise foi feita pela técnica Monte Carlo, com 1.000 interações, com distribuição lognormal e intervalo de confiança de 95% para cada uma das categorias associadas ao método CML. Recomenda-se utilizar, no mínimo, 1.000 interações quando se deseja representar a distribuição de resultados graficamente (GOEDKOOOP *et al.*, 2016), como apresentado em outros estudos (SILVA *et al.*, 2016; MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018).

7.2.3.1 Matriz de Pedigree

A Matriz de Pedigree é a metodologia mais utilizada para estimativa de incertezas em estudos de ACV (GREGORY; MONTALBO; KIRCHAIN, 2013). No Quadro 1, está representada a matriz de qualidade dos dados e seus indicadores. Cada indicador recebe uma pontuação que vai de 1 a 5, onde 1 representa a melhor nota, e 5 a pior, em relação à qualidade do dado.

Quadro 1 – Matriz de Pedigree

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5
Confiança	Dados verificados baseados em medidas	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativas qualificadas (ex. perito industrial):	Estimativas não qualificadas
Completeza	Dados representativos de todos os locais relevantes para o mercado considerado e com período superior e adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o mercado considerado com período superior e adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de somente alguns locais (< 50%) relevante para o mercado considerado ou > 50% dos locais, mas com períodos curtos	Dados representativos de apenas um local relevante para o mercado considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e períodos curtos
Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Menos de 6 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Menos de 10 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Menos de 15 anos de diferença para o período do conjunto de dados	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença para o período do conjunto de dados
Correlação geográfica	Dados da área de estudo	Dados médios da grande área na qual a área de estudo está incluída	Dados da área com condições de produção semelhantes	Dados de área com condições de produção ligeiramente similares	Dados da área desconhecida ou área com muita diferença nas condições de produção
Correlação tecnológica	Dados de empreendimentos, processos e materiais em estudo	Dados de processos e materiais em estudo (ex. tecnologia idêntica), mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais em estudo, mas de diferentes tecnologias	Dado de processos ou materiais relacionados	Dados de processos relacionados em escala laboratorial ou de diferentes tecnologias

Fonte: Adaptado de Weidema *et al.*, 2013

O uso da Matriz de Pedigree envolve julgamentos, com base nos conhecimentos obtidos em campo, portanto, foram discutidos coletivamente entre especialistas na área de ACV (os autores) a fim de aumentar a qualidade e diminuir a subjetividade na aplicação do método.

As notas da matriz de Pedigree foram estabelecidas tendo em vista a qualidade dos dados coletados. Para o cimento: em relação à confiabilidade, foi atribuída a nota (1), pois a quantidade do material foi medida no local; o indicador completeza recebeu nota (2), pois é representativo para as empresas estudadas e para o período, mas pode variar em outras regiões. Para correlação temporal e geográfica, a pontuação atribuída foi (1), uma vez que são dados de um ano de produção e coletados na área de estudo. O indicador correlação tecnológica foi pontuado com nota 2, pois são dados de empresas diferentes com tecnologias idênticas.

O desmoldante utilizado é resíduo de óleo lubrificante de motocicleta, comumente chamado de “óleo queimado”. Em relação à confiabilidade e completeza, recebeu nota (2), pois

a quantidade foi estimada pelo gerente da empresa e é representativo para as empresas estudadas e para o período. Algumas empresas utilizam outros tipos de produto como desmoldante, como os industriais, portanto é um dado específico, que representa a realidade das empresas visitadas. Em relação à correlação temporal e geográfica, a pontuação atribuída foi (1), uma vez que são dados de um ano de produção e coletados na área de estudo. O indicador correlação tecnológica recebeu nota (2) por serem dados de empresas diferentes com tecnologias idênticas.

Para a energia elétrica utilizada, foi feita a média de um ano de consumo, pela conta de energia emitida pela concessionária local, a qual foi fornecida pelo gerente da empresa. Nesse caso, a confiabilidade recebeu nota (1) pois reflete, fielmente, a quantidade de energia medida no local. Em relação à completeza, a pontuação foi (2), pois é um dado representativo para as empresas estudadas e para o período, mas é variável em outras indústrias. Para o indicador correlação temporal e geográfica foi atribuída nota (1), uma vez que são dados de um ano de produção e coletados na área de estudo e a correlação tecnológica recebeu nota (2), pois são dados de empresas diferentes com tecnologias idênticas.

A quantidade de brita utilizada foi medida no local, recebendo pontuação (1) para o indicador confiabilidade. Para a completeza, a nota foi (2), pois é um dado representativo para as empresas estudadas e para o período, mas pode variar em outras indústrias. Para os indicadores correlação temporal e geográfica foi atribuída a nota (1), por serem dados de um ano de produção e coletados na área de estudo. No caso da correlação tecnológica, a pontuação foi (4), uma vez que a base de dados Ecoinvent não possui banco de dados para o mineral diabásio (do qual a brita utilizada nessas empresas é proveniente). Assim, atribuiu-se essa nota pois são dados de processos e materiais similares ao utilizado nas empresas estudadas.

Os vergalhões de aço tiveram a quantidade utilizada estimada pelo gerente da empresa, recebendo nota (4) no indicador confiabilidade. Para a completeza, foi atribuída nota (2), uma vez que o dado é representativo para as empresas estudadas e para o período. Nesse caso, os indicadores correlação temporal e geográfica, também, receberam nota (1), pois são dados de um ano de produção e foram coletados na área de estudo. A correlação tecnológica foi pontuada com (2), uma vez que são dados de empresas diferentes com tecnologias idênticas

Assim como outros insumos, a areia teve sua quantidade utilizada medida no local, agregando nota (1) ao indicador confiabilidade. A completeza recebeu pontuação (2), pois o dado é representativo para as empresas estudadas e para o período, mas pode variar em outras regiões/indústrias. A correlação temporal e geográfica recebeu nota (1), por serem dados de um ano de produção e coletados na área de estudo. Para a correlação tecnológica foi atribuída nota

(3), uma vez que os dados são de empresas diferentes, com mesmo material, mas tecnologias diferentes (tipo de dragagem).

Para a água, a quantidade utilizada na produção de postes foi medida no local, no entanto, o consumo para a umidificação (processo de cura) e para as instalações físicas foi estimado, recebendo nota (2). O indicador completeza foi pontuado com nota (2), é representativo para as empresas estudadas e para o período, mas pode variar em outras indústrias. A correlação temporal e geográfica recebeu nota (1), pois são dados de um ano de produção e coletados na área de estudo e a correlação tecnológica obteve nota (2), uma vez que os dados são de empresas diferentes com a mesma tecnologia.

O transporte recebeu a pior nota em relação à confiabilidade e completeza (4), pois as distâncias foram estimadas entre as cidades, e não entre a indústria fornecedora do insumo e as empresas estudadas. Em relação à correlação temporal, geográfica e tecnológica, recebeu a mesma pontuação de outros insumos (1), (1) e (2), respectivamente.

Dentre os *outputs* selecionados no banco de dados do Ecoinvent, o material particulado (emissões de poeira provenientes da abertura do saco de cimento) recebeu nota (3) para confiabilidade e completeza, por ser um dado estimado com base na literatura científica, e para correlação geográfica por ser um dado de uma área similar à área de estudo. Para correlação temporal, a nota foi (2), pois é um dado de menos de 6 anos de diferença para o ano do estudo e correlação tecnológica recebeu pontuação (4), por ser um dado de material em estudo, mas de tecnologia diferente.

Para os resíduos de concreto, a confiabilidade recebeu nota (3), por ser um dado estimado, baseado na literatura científica e a completeza foi pontuada com nota (2), pois representa mais de 50% dos locais relevantes para o mercado considerado. No caso da correlação temporal, a pontuação foi (5), pois é uma estimativa com mais de 15 anos de referência, a correlação geografia recebeu nota (3), por ser uma área similar à área de estudo e a correlação tecnológica (4), por serem dados relativos ao mesmo material em estudo, mas com tecnologia diferente.

Em relação aos resíduos dos vergalhões de aço, as notas para confiabilidade, completeza e correlação geográfica foi (3), por ser um dado estimado com base na literatura científica e de uma área similar à área de estudo. Para correlação temporal, a pontuação foi (2), pois é um dado de menos de 6 anos de diferença para o ano do estudo e a correlação tecnológica foi pontuada com (4), por ser um dado de material em estudo, mas de tecnologia diferente.

Os efluentes, também, foram pontuados com nota (3) para confiabilidade e completeza por ser um dado estimado com base na literatura científica. Para correlação temporal, a

pontuação foi (2), pois é um dado de menos de 6 anos de diferença para o ano do estudo e os indicadores correlação geográfica e tecnológica receberam nota (4), por ser um dado de área com condições de produção similares e de material em estudo, mas de tecnologia diferente.

De posse dos resultados obtidos com o preenchimento da Matriz Pedigree, foi possível utilizar a análise estatística de Monte Carlo, disponível no *software* OpenLCA para calcular a incerteza absoluta, a qual é amplamente utilizada nos estudos de ACV (SILVA *et al.*, 2016).

7.2.4 Caracterização geral das indústrias

O tipo de poste comumente produzido por essas indústrias é o Poste Duplo T, que é uma estrutura retangular rígida, com perfil em T nas duas faces, utilizado para suspender cabos e equipamentos elétricos para subestações e redes de distribuição de energia. Além dos postes, as indústrias fabricam, também, as cruzetas utilizadas para a suspensão dos fios da rede de distribuição de energia. Para esse estudo foram analisados, apenas, os postes, sem incluir as cruzetas.

A fabricação desse produto atende, principalmente, a demanda de postes da Equatorial Energia, antiga Companhia Energética do Piauí (CEPISA), no estado do Piauí. A estrutura de mercado desse setor, em Teresina-PI, pode ser considerada monopólio, uma vez que mais de 90% da produção dessas indústrias é destinada a apenas um comprador, que tem poder de determinar o preço de aquisição desses produtos.

A indústria C é a maior das quatro empresas visitadas e possui uma produção equivalente ao dobro das indústrias A e B, em conjunto. As matérias-primas utilizadas no processo produtivo são adquiridas em fornecedores diferentes, de acordo com a viabilidade de compra de cada empresa. A distância das empresas fornecedoras dos insumos que abastecem essas indústrias está descrita na Tabela 3, bem como a distância média percorrida dentro da empresa para o transporte dos postes até a área de cura, que fica à, aproximadamente, 700 metros da área de produção. Considerando que cada caminhão carrega seis postes, para a produção mensal de 1.750 postes (fluxo de referência), a distância média percorrida internamente, para o transporte da área de produção até a área de cura é de, aproximadamente, 204 km. Para esse transporte, são necessários caminhões e equipamentos apropriados, como caminhão Munck.

Tabela 3 – Distância dos insumos às indústrias

Insumo	Distância (km)
Transporte interno	204
Brita	30
Areia	20
Cimento CP V ARI	1.200
Desmoldante (óleo queimado)	10
Vergalhões de aço	20

Fonte: Gestor da indústria

Questões como descontos, promoções, preço do frete, compra em grande escala, entre outros, determinam a opção da indústria pelos fornecedores. Nem sempre o fornecedor mais próximo possui o insumo mais barato, o que leva a indústria a buscar o produto, algumas vezes, em outros estados. A brita, por exemplo, não é produzida em Teresina, sendo proveniente de Monsenhor Gil – PI, em função da disponibilidade natural do diabásio (mineral do qual a brita é produzida), nessa região.

O cimento, também, não é adquirido da fábrica mais próxima de Teresina (400 km) em virtude do melhor preço encontrado em outras cidades, mesmo percorrendo uma distância média de 1.200 km. A possibilidade de obter esse insumo próximo de Teresina poderia reduzir os impactos ambientais provocados pelo transporte rodoviário, os quais estão relacionados, basicamente, ao tipo de combustível utilizado que, quando queimado, pode gerar emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) e diversos outros poluentes.

As máquinas e equipamentos utilizados por essas indústrias são: betoneiras para a produção de concreto, fôrmas metálicas (de aço) de diferentes tamanhos, vibradores instalados nas fôrmas para a distribuição uniforme do concreto à armação de aço, caminhões para serviço interno e transporte, caminhões com isolamento para efetuar serviços na rede elétrica, retroescavadeiras e empilhadeiras. A indústria C possui, ainda, um trator com um tanque de capacidade de 5 mil litros de água para umidificação dos postes e pontos de irrigação, com aspersores de água, que são ligados, periodicamente, na área de cura.

O quadro de funcionários é composto por equipes que trabalham na montagem dos vergalhões (encarregado, ferreiro armador, soldador) e na fabricação do concreto (armador de concreto). Além disso há funcionários nas funções de motoristas, almoxarife, serviço gerais, operadores de retroescavadeira/empilhadeira e na área administrativa. Na execução das obras de rede de distribuição de energia elétrica e construção de subestações há equipes compostas por encarregados de obras elétricas e civis, eletricitas, auxiliares de eletricitas, pedreiros e vigilantes. As empresas contam, ainda, com equipes de apoio formadas por engenheiro eletricitista, engenheiro civil, supervisores de obras, eletrotécnicos e técnicos de segurança.

7.2.5 Processo de produção de postes

O fluxograma do processo de fabricação de postes está descrito na Figura 1. Primeiramente é feita a montagem da armação com os vergalhões de aço, inserindo os estribos de acordo com o tipo de poste, altura, resistência, esforço e quantidade de gavetas, os quais são determinados por normas específicas. Depois de pronta, a armação segue para a fôrma, preparada com desmoldante. Enquanto a armação está sendo preparada, outra equipe de funcionários está produzindo o concreto. Nas quatro indústrias são utilizadas fôrmas metálicas de aço.

Durante a concretagem é feita a vibração para acomodar o material e evitar bolhas de ar, que podem alterar a qualidade e resistência do poste. Após a concretagem, é iniciado o processo de umidificação para garantir a qualidade durante a cura do material. As indústrias A, B e D utilizam mantas úmidas para evitar a evaporação excessiva e manter o tempo adequado de cura. A indústria C usa aspersores de água com a mesma finalidade. Durante sete dias, os postes são umedecidos até atingir a cura inicial e, então, são deslocados para o estoque, onde permanecem por 28 dias até a completar o tempo necessário para a cura final e atingir a resistência do concreto, uma vez que 28 dias é uma medida padrão de resistência à compressão. Após esse período, é feita a entrega/instalação dos mesmos.

A estimativa de consumo de água, durante o processo de cura, foi feita com base em Pessarello (2008): para a molhagem das mantas umidificadoras são consumidos $0,02 \text{ l/m}^2$ e para a lâmina de água, $0,05 \text{ l/m}^2$. O tipo de poste estudado possui uma superfície de $9,76 \text{ m}^2$. Assim o total de água utilizado no processo de cura, tendo em vista a produção de 1.750 postes (fluxo de referência) é de 1.195 litros. Foi estimado, também, o consumo de água para as instalações da indústria (escritório, refeitório, banheiros), com base no consumo de outras indústrias de mesmo porte, assumindo o valor médio mensal de 10 m^3 mensais, ou seja, 10.000 litros.

Além da umidificação, a água possui várias funções no processo de produção do poste, e seu controle é essencial. Ela é reagente químico indispensável na formação do concreto (reação de hidratação) e é, também, agente refrigerante para conter a elevação da temperatura dos produtos (reações exotérmicas do processo de hidratação), responsáveis pela causa das fissuras no concreto.

É possível acontecer um problema técnico, que são postes com deformidades em função da deficiência no processo de cura (FUNAMOTO, 2014; ROBERTS; LEES; HOULT, 2017), devido à colocação de carga sem que o produto esteja pronto para uso. Essa situação pode ser observada nos postes tortos e deformados encontrados nas cidades (Figura 2). Problemas como

o mencionado podem ser vistos em postes que sofrem tensão assimétrica (força de tração resultante diferente de zero). Postes que possuem fios puxando com forças auto equilibradas dos dois lados podem ter defeitos, mas os mesmos não são percebidos.

Figura 2 – Postes com deformidades

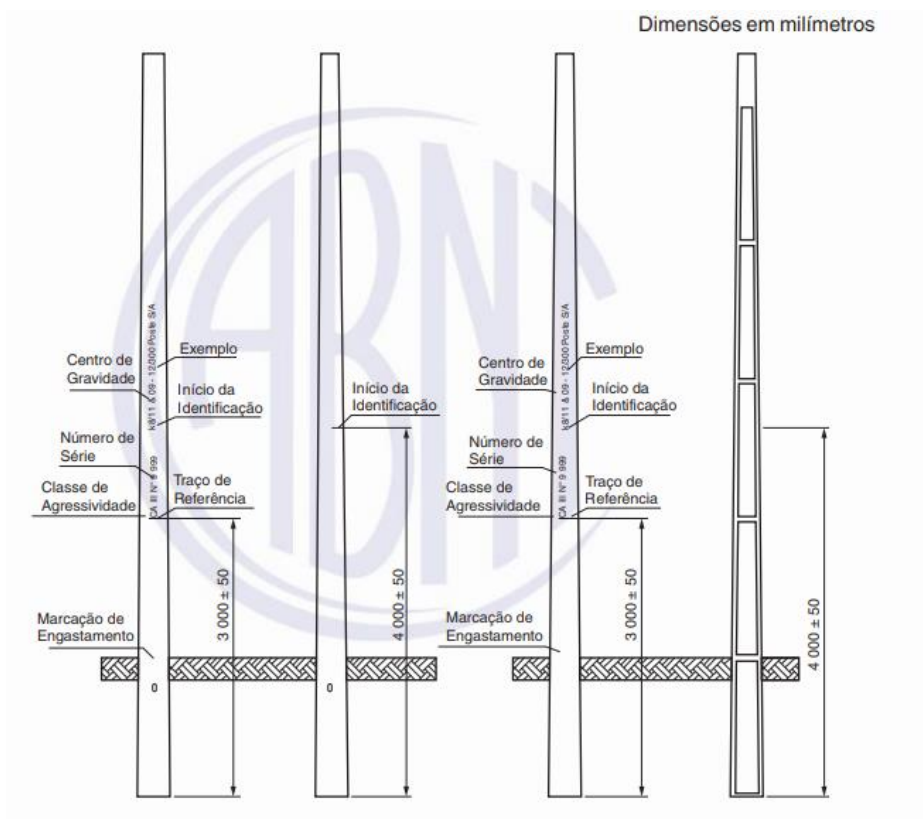


Fonte: Autores

Na parte superior da estrutura há uma sequência de furos para fixar os equipamentos, como cabos, fios etc., além das cruzetas. Todos os postes possuem uma identificação que funciona como uma “etiqueta”, onde são inseridas informações como: resistência mecânica, carga nominal, altura, data de fabricação, fabricante e número de série. Na face lisa contém, também, a informação do centro de gravidade, expressa por um triângulo, e a marca do engastamento¹³, expressa pela letra E (Figuras 3).

¹³ Processo de encravamento do poste no solo, que serve de apoio estrutural, impedindo todos os movimentos de rotação e translação da estrutura (ABNT, 2011). Indica a porção do poste que deve estar engastada (presa) na fundação do poste.

Figura 3 – Identificação de postes Duplo T, segundo a ABNT



Fonte: ABNT NBR 8451-1:2011 (BRASIL, 2011)

7.3 Resultados

7.3.1 Resultado da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A partir da inserção dos dados no *software* OpenLCA foram criados os processos baseados nos dados levantados ou encontrados na base de dados, que nesse estudo é o Ecoinvent 3.7.1. Uma vez determinados os processos, é possível criar um sistema de produto que gera a análise do inventário (Tabela 4). Para cada uma das categorias de impacto do método CML (*baseline*) são apresentados os resultados, com base na unidade de referência de cada uma. Apenas a categoria ecotoxicidade marinha não será incluída pois não é indicada na norma EN 15804:2019 (BS, 2019).

Tabela 4 – Resultado do Impacto do Ciclo de Vida da produção de postes (UF – 1 poste)

Categoria de impacto	Resultado do impacto	Unidade
Depleção de recursos abióticos (minerais)	6,90E-04	kg Sb eq
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	2747.33	MJ
Acidificação	0.84	kg SO ₂ eq
Eutrofização	0.28	kg PO ₄ --- eq
Ecotoxicidade de água doce	171.81	kg 1,4-DB eq
Aquecimento Global	252.82	kg CO ₂ eq
Toxicidade humana	149.25	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade terrestre	0.29	kg 1,4-DB eq
Depleção da camada de ozônio	2.71E-5	kg CFC-11 eq
Oxidação fotoquímica	0.06	kg C ₂ H ₄ eq

Fonte: Autores

As categorias de impacto selecionadas para análise foram: ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, aquecimento global, depleção de recursos abióticos (minerais e fósseis) e acidificação. Além de serem as de maior proeminência após a normalização, são as categorias que costumam sobressair em estudos dessa natureza (SOUZA *et al.*, 2017). Cada uma será analisada detalhadamente, em ordem decrescente.

7.3.1.1 Ecotoxicidade de água doce

Essa categoria de impacto está relacionada ao potencial de toxicidade de águas doces de diversas fontes. As substâncias tóxicas têm seus valores expressos em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente (kg 1,4-DB eq). A toxicidade, ou ecotoxicidade, reflete o potencial de que uma substância tem de causar um efeito danoso a um organismo vivo ou a um ecossistema, como o aquático. A concentração e as propriedades da substância química à qual o organismo, ou ambiente, é exposto, além tempo de exposição, determinam o grau de toxicidade (COSTA *et al.*, 2008).

No método CML, esses indicadores de categoria referem-se ao impacto nos ecossistemas, como resultado das emissões de substâncias tóxicas no ar, na água e no solo. O potencial de ecotoxicidade é calculado descrevendo o destino, a exposição e os efeitos de substâncias tóxicas, com horizonte temporal infinito (PRÉ CONSULTANTS, 2019).

A disposição final de resíduos pode ser considerada como a maior contribuinte com os potenciais impactos de ecotoxicidade em função das emissões de curto e longo prazo, para solo e ar, provenientes da grande quantidade de resíduos de postes acumulados no pátio das indústrias. Na análise do impacto ficou evidente a contribuição das emissões provenientes de resíduos, com destaque para as substâncias íons de níquel, cobre, vanádio, cobalto, entre outras.

Conforme percebido durante as visitas, resíduos de concreto, óleo queimado e vergalhões de aço acumulam-se no solo durante o processo de produção dos postes, contaminando o lençol freático, aumentando a contribuição para essa categoria de impacto. Silva *et al.* (2020a), em seu estudo sobre produtos brasileiros da construção civil, concluíram que as emissões provenientes de resíduos e rejeitos, também, foram os maiores contribuintes para as categorias relativas à ecotoxicidade.

O estudo de Souza (2014) demonstrou que, após a etapa de normalização, essa foi a categoria que emergiu como a mais impactante para os postes de concreto. Esse fato corrobora os achados dessa pesquisa. Os valores entre os potenciais impactos não podem ser comparados pois os estudos encontrados, desenvolvidos sobre ACV de postes de concreto, apresentam parâmetros diferentes. Para tornar possível a comparação entre os resultados das categorias de impacto é necessário que os estudos tenham a mesma unidade funcional, utilizem o mesmo método de AICV e um conjunto de dados parecido. Se um ou mais desses parâmetros for diferente, a comparação fica inviável.

7.3.1.2 Toxicidade humana

Para essa categoria, o método CML considera as emissões um horizonte de tempo infinito (SOUZA, 2014) e as substâncias tóxicas têm seus valores expressos em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente (kg 1,4-DB eq). A análise demonstrou significativa contribuição do processo de produção de vergalhões de aço, com destaque para as emissões para o ar de dioxinas, medidas como 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina, benzeno e cromo VI. O segundo processo que emerge como maior contribuinte para essa categoria é o transporte, seguido pelo tratamento e disposição de resíduos.

Segundo o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (ACV-IBICT, 2020), a disposição de resíduos/rejeitos gera potenciais danos à saúde resultando no aumento da concentração de substâncias tóxicas para a categoria toxicidade humana, o que corrobora os resultados da análise. É importante analisar a categoria toxicidade humana em ACVs de materiais construtivos devido à quantidade de emissões, muitas vezes, tóxicas, provenientes dos processos produtivos dessas indústrias (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018).

Nessa categoria, destacaram-se, ainda, as emissões de poeira durante o processo de produção dos postes, bem como do deslocamento de veículos (dentro e fora da indústria), que contribuem, também, com as emissões atmosféricas. Conforme percebido nas visitas, há necessidade de locomoção dos postes tanto para a área de cura, como para a instalação, o que é feito com ajuda de caminhões Munck.

A falta de estudos que avaliam essa categoria, na mesma perspectiva dessa pesquisa, torna inviável a comparação entre resultados. No entanto, no estudo de Souza (2014), embora realizado em condições diferentes, a toxicidade humana emerge como a segunda categoria mais impactante após a normalização dos resultados, compatível com os achados nesse estudo.

7.3.1.3 Aquecimento global

Nessa categoria é considerado o potencial de emissões atmosféricas (gases de efeito estufa) que contribuem para o aquecimento global, o qual é expresso em um horizonte temporal de 100 anos, em kg de Dióxido de Carbono equivalente (kg CO₂ eq). O aquecimento global contribui para as mudanças climáticas que podem ocasionar efeitos adversos na saúde humana, nos ecossistemas e nos bens materiais. No método CML, os fatores de caracterização são baseados no modelo desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (PRÉ CONSULTANTS, 2019; IPCC, 2020).

A fabricação de cimento e o transporte são os processos que apresentam maior impacto, nessa categoria, por envolver emissões de CO₂, devido, às emissões atmosféricas e à produção de clínquer. O teor de clínquer nos diferentes tipos de cimento resultam no aumento, ou diminuição, do impacto relativo ao aquecimento global (SILVA *et al.*, 2019) Além do CO₂, destacam-se as emissões para o ar de metano e monóxido de dinitrogênio, provenientes da produção de vergalhões e explosões de rocha (processo de mineração). O processo de geração de energia e tratamento de resíduos tiveram menor participação, também, com destaque para as emissões de CO₂, responsáveis pelo aumento do aquecimento global.

No estudo de Lu e El Hanandeh (2017) sobre a comparação entre tipos diferentes de postes, o valor encontrado para o impacto nessa categoria foi 220.644 kg CO₂ eq, um pouco abaixo do potencial impacto verificado nesse estudo. Essa diferença pode ser atribuída à unidade funcional e ao método adotados, que no estudo de Lu e El Hanandeh (2017) foi um poste de 12,5 m e ReCiPe, respectivamente. No entanto, os autores concluíram que o transporte, o consumo de combustível fóssil, bem como uso de materiais que demandam intenso consumo de energia durante o processo de fabricação dos postes são os maiores contribuintes para a categoria aquecimento global, assim como os achados dessa pesquisa.

7.3.1.4 Depleção de recursos abióticos (minerais e fósseis)

A extração intensa dos recursos minerais pode levar ao esgotamento, uma vez que são recursos não renováveis e não podem, de nenhuma forma, ser repostos na natureza. O impacto dessa categoria é medido Mega joule (MJ), para recursos fósseis, e em kg de antimônio

equivalente (kg Sb eq), para recursos minerais. A mineração é a atividade que promove esse impacto pois os recursos minerais/fósseis são retirados do ambiente por meio de diferentes processos que levam à depleção dos mesmos. Nessa categoria são contabilizados processos minerários que envolvem outros tipos de metais, como manganês, cobre, ferro, zinco, uma vez que, na natureza, um mineral é extraído de um depósito (mina) e a maioria dos depósitos contém vários minerais (Goedkoop *et al.*, 2013).

Os recursos extraídos que mais sobressaíram na análise foram: carvão, gás natural e petróleo, para os recursos fósseis e zinco e cobre, para os recursos minerais, os quais são utilizados em vários processos para a produção de postes, tais como, a geração de energia, fabricação de cimento, produção de concreto, produção de vergalhões e transporte. Os processos de disposição de resíduos e fabricação de óleo lubrificante, também, contribuíram nessa categoria, porém em pequena proporção.

A participação do processo de extração da brita utilizada na mistura do concreto, apresentou resultado menos relevante, na análise. Isso pode ser explicado pela quantidade necessária de outros recursos minerais para a geração de energia, por exemplo, ser muito maior do que a quantidade extraída de minério para a produção de brita. O mesmo pode ser aferido para a areia, que apresenta processos ainda mais simples e manuais de extração, gerando impacto menor.

O mineral utilizado nas indústrias pesquisadas é o diabásio, diferente do que consta na base de dados Ecoinvent 3.7.1, o basalto. Os efeitos em relação ao método de extração (utilização de explosivos) pode ser o mesmo e promover efeitos semelhantes, mas alguns podem ser diferentes, tendo em vista o mineral utilizado. Assim, não foi encontrado, na literatura, nenhum estudo em condições semelhantes a esse para que os resultados das categorias de impacto pudessem ser comparados.

7.3.1.5 Acidificação

O indicador de impacto da acidificação refere-se aos fatores relacionados ao potencial relativo de substâncias químicas liberadas para formar ácidos na atmosfera, isto é, avalia o potencial de emissões para o ar que resultam em deposição de chuva ácida na superfície da Terra. (BOLIN; SMITH, 2011). A deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, como sulfatos, nitratos e fosfatos, causa uma alteração na acidez do solo, processo chamado de acidificação. As principais emissões acidificantes são NO_x, NH₃ e SO₂ (GOEDKOOOP *et al.*, 2013). As substâncias acidificantes causam uma ampla gama de impactos no solo, nas águas subterrâneas, nas águas superficiais, nos organismos, nos ecossistemas e nos materiais

(edifícios) (PRé CONSULTANTS, 2019). O potencial de acidificação descreve o destino e a deposição de substâncias acidificantes e é expresso em kg de dióxido de enxofre equivalente (kg SO₂ eq.)

A produção de vergalhões de aço (relacionado às emissões de NO_x, SO₂) foi o processo que mais contribuiu para esta categoria, seguido pela produção de cimento. Algumas etapas da produção de aço e cimento demandam energia não renovável (carvão e gás natural) o que potencializa os resultados para essa categoria. Além disso, as operações da mineração (explosões de rocha, principalmente), tiveram participação para o impacto de acidificação.

O estudo de Silva et al. (2020b) mostrou que a produção de brita contribui para os potenciais de acidificação da produção de concreto, devido a emissões decorrentes do uso de explosivos no desmonte de rocha, corroborando os achados nesse estudo. Lu e El Hanandeh (2017) encontraram valores, relativamente, próximos aos desse estudo (1.228 kg SO₂ eq), embora tenham desenvolvido uma pesquisa sobre postes de concreto com alguns parâmetros diferentes aos desse trabalho.

7.3.2 Resultado da Análise de Incerteza

Estudos de ACV requerem transparência na comunicação dos resultados, uma vez que não existem dados científicos que não se conheça a sua incerteza (medida ou estimada). Com esse parâmetro é possível estabelecer comparações entre resultados e descobrir diferenças que são significativas, ou não, garantindo a confiabilidade dos resultados, por meio da análise de incertezas. Nas situações em que as incertezas não podem ser medidas, por exemplo, determinando o desvio padrão, há possibilidade de se fazer estimativas, através da qualidade dos dados obtidos. Conhecendo a origem dos dados e sua aplicabilidade aos sistemas de estudo é possível construir uma matriz de Pedigree.

A matriz Pedigree é utilizada para atribuir aos dados valores padronizados de incerteza básica, de acordo com a sua qualidade, enquanto a incerteza adicional está incluída o método (CML). Existem casos em que diferentes parâmetros, com incertezas variadas, interagem por meio de uma relação complexa. Nessas situações, a incerteza dos resultados pode ser mais convenientemente encontrada através de uma simulação de Monte Carlo.

A simulação determina valores aleatórios para os dados de entrada de acordo com a distribuição probabilística informada para cada dado. A técnica de Monte Carlo é amplamente utilizada para analisar incertezas em diferentes produtos, áreas de pesquisa e setores industriais. (POMPONI; D'AMICO; MONCASTER, 2017). Portanto o procedimento executado está em sintonia com os melhores procedimentos científicos de determinação de incertezas em tais

situações. Os métodos de simulação de Monte Carlo são de baixa convergência e demandam grande esforço computacional para atingir resultados aceitáveis.

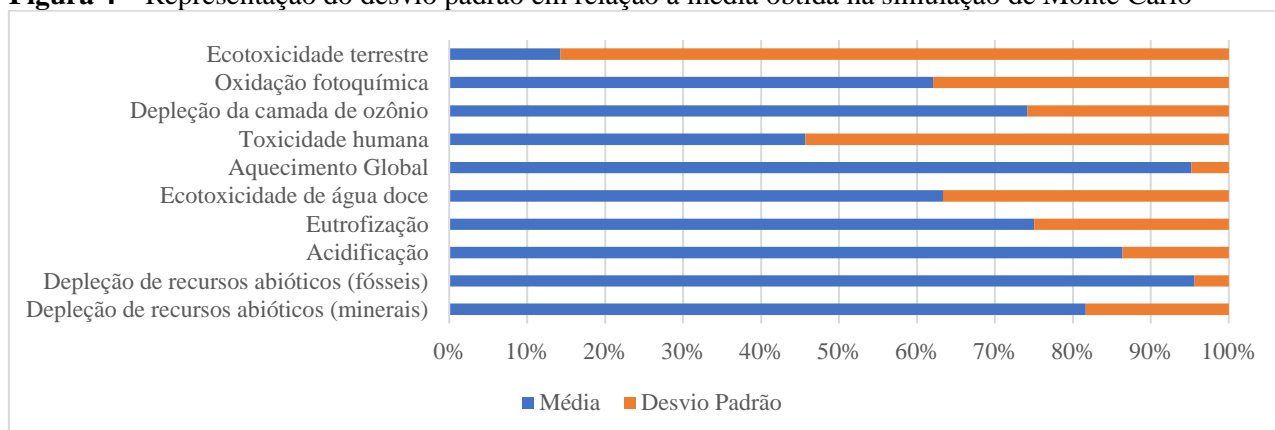
A análise foi feita com 1.000 interações, com distribuição lognormal e intervalo de confiança de 95% para cada uma das categorias associadas ao método CML. Goedkoop *et al.* (2016) recomendam utilizar, no mínimo, 1.000 interações quando se deseja representar a distribuição de resultados graficamente. Essa quantidade de interações, também, foi utilizada em outros trabalhos sobre materiais construtivos, que envolvem a análise de incertezas por meio da simulação de Monte Carlo (SILVA *et al.*, 2016; MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018). Heijungs (2020) afirma que, normalmente, são executadas 1.000 ou 10.000 interações, mas com o tamanho crescente dos bancos de dados ACV, um número excessivamente alto de execuções pode ser inviável pela demora na obtenção dos resultados.

Na Tabela 5 está representado resultado da média e do desvio padrão, para cada categoria, com as respectivas unidades de referência e na Figura 4 consta a representação aproximada do desvio padrão em relação à média encontrada na análise. A notação da Tabela 5 é comum na engenharia e indica a potência de 10 correspondente, por exemplo, 2E+3 corresponde ao valor 2000 (ou 2×10^3). Uma análise comparativa das incertezas, frente aos valores médios de cada categoria de impacto, pode ser obtida pelo desvio padrão relativo ou coeficiente de variação.

Tabela 5 – Resultado da análise de incerteza utilizando a combinação da Matriz Pedigree com a simulação Monte Carlo (1.000 interações e 95% de confiança)

Categoria de impacto	Média	Desvio Padrão	Unidade	Coefficiente de variação (%)
Depleção de recursos abióticos (minerais)	4,25E-04	9,55E-05	kg Sb eq	22,5
Depleção de recursos abióticos (fósseis)	1,25E+03	5,72E+01	MJ	4,6
Acidificação	5,05E-01	7,96E-02	kg SO2 eq	15,8
Eutrofização	2,49E-01	8,29E-02	kg PO4--- eq	33,3
Ecotoxicidade de água doce	2,28E+02	1,32E+02	kg 1,4-DB eq	57,9
Aquecimento Global	1,54E+02	7,80E+00	kg CO2 eq	5,1
Toxicidade humana	2,00E+02	2,38E+02	kg 1,4-DB eq	119,0
Depleção da camada de ozônio	1,14E-05	3,97E-06	kg CFC-11 eq	34,8
Oxidação fotoquímica	6,63E-02	4,05E-02	kg C2H4 eq	61,1
Ecotoxicidade terrestre	4,38E-01	2,63E+00	kg 1,4-DB eq	600,5

Fonte: Autores

Figura 4 – Representação do desvio padrão em relação à média obtida na simulação de Monte Carlo

Fonte: Autores

Os resultados do gráfico da Figura 4, assim como a porcentagem do coeficiente de variação, demonstram que os maiores valores foram apontados para as categorias ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana. O desvio padrão é usado para descrever a variação nas medidas de uma variável para os membros de uma amostra. É uma medida de dispersão e o seu valor reflete a variabilidade das observações em relação ao valor médio. Isso significa que quanto menor a dispersão entre os dados e a variabilidade associada à distribuição em análise, menor será seu valor (SEDGWICH, 2015).

Segundo Rodrigues, Nunes e Adriano (2010) quanto maior forem os desvios dos valores estimados, em relação aos valores esperados, maior será sua variância, e, portanto, maior será seu risco. Aplicando o conceito aos resultados encontrados, pode-se concluir que as maiores incertezas estão concentradas nas categorias depleção de ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana, uma vez que apresentaram alto valor de dispersão, indicados pela variância no desvio padrão. A categoria aquecimento global apresentou coeficiente de variação muito baixo, o que pode ser explicado pelo fato de que no cálculo para o potencial de aquecimento global é adotado o indicador do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2020), o que garante maior robustez científica, com incertezas descritas e calculadas, segundo Hauschild *et al.* (2013),

O alto grau de incerteza para categorias associadas à toxicidade e ecotoxicidade pode se dar pelo fato do uso de dados secundários. Fiori, Cybis e Fernandes (2014), ao analisarem os resultados de três cenários diferentes, concluíram que o cenário que apresentou o melhor resultado na análise de incerteza foi aquele em que a maioria dos dados utilizados foram coletados *in loco* (primários). Nos cenários em que foram utilizados mais dados secundários, considerados parcialmente representativos na análise, foi constatada distribuição aleatória mais dispersa e maior nível de incerteza. Silva *et al.* (2018), também, sugerem que dados estimados

aumentam as incertezas, especialmente, em estudos relativos a materiais construtivos. Nesse estudo foram utilizados dados secundários da base Ecoinvent 3.7.1, além de dados estimados no que se refere aos resíduos, o que pode aumentar o grau de incerteza, nessas categorias.

Lasvaux *et al.* (2016) observam que há uma tendência de correlação para indicadores de ecotoxicidade em ACVs de materiais de construção. As categorias de toxicidade e ecotoxicidade são sensíveis às emissões liberadas durante o ciclo de vida, principalmente, nos processos relacionados à destinação dos resíduos, que contribuem para a potencialização dos impactos de emissões tóxicas, especialmente, relacionadas às categorias de ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana.

Embora grande parte dos dados do Ecoinvent 3.7.1, utilizados nesse estudo, abarque cenários brasileiros, os dados relativos ao transporte, produção de vergalhões de aço e óleo lubrificante não são específicos do Brasil. Em um estudo com aplicação para a realidade brasileira, o uso de dados de inventário coletados tendo em vista a realidade europeia pode representar parte das incertezas (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018). Portanto, segundo Bueno *et al.* (2016), o desenvolvimento de modelos de caracterização baseados em características ambientais regionais pode resultar em estudos mais específicos e padronizados da ACV, o que aumentaria a confiabilidade dos resultados, reduzindo, significativamente, suas incertezas inerentes.

7.4 Discussão dos resultados

7.4.1 Interpretação dos resultados da AICV

No método adotado (CML) o fator de caracterização para ecotoxicidade e toxicidade humana considera a persistência ambiental (destino) dos produtos químicos, sua ingestão por seres humanos e acúmulo na cadeia alimentar (exposição) e a toxicidade de um produto químico, isto é, os efeitos nos seres humanos e nos ecossistemas (PRé CONSULTANTS, 2019). Uma das justificativas para a proeminência expressiva dessas categorias de impacto, em relação às outras, explica-se pelo acúmulo dos resíduos dessas indústrias, o que causa contaminação do solo e das águas (subterrâneas e superficiais) e do ar.

Teresina-PI, cidade onde as indústrias estão instaladas, é cercada por dois grandes rios: Parnaíba e Poti, que recebem os resíduos gerados por essas empresas. O rio Parnaíba é o maior rio do Nordeste do Brasil com 1.400 km de extensão. Toda a bacia do Parnaíba cobre,

aproximadamente, 3,9% do território brasileiro e quase todo o estado do Piauí (99% do território). O rio Parnaíba recebe, como afluente, o rio Poti e desagua no Oceano Atlântico, na cidade de Parnaíba-PI (litoral do estado do Piauí). Sua foz é composta pelo Delta do Rio Parnaíba (RAMOS; RAMOS, R.; RAMOS, S., 2014). O rio Parnaíba recebe os produtos químicos provenientes da falta de tratamento dos resíduos dessas indústrias, indicando o potencial impacto para a categoria ecotoxicidade de água doce.

O estudo comparativo entre postes de madeira e de concreto, desenvolvido por Souza *et al.* (2017), mesmo sendo realizado em outro contexto geográfico, apontou a categoria relativa à ecotoxicidade como uma das mais impactante para os postes de concreto, com impactos provenientes da disposição final dos resíduos. Para os autores, ao invés dos resíduos serem destinados a aterros, deveriam ser reciclados, como para uso em pavimentação asfáltica na forma de brita, resultando em redução no impacto potencial das categorias de ecotoxicidade.

A toxicidade humana é a categoria de impacto ambiental resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos, proveniente da disposição de rejeitos e resíduos, ocasionando potenciais danos à saúde (ACV-IBICT, 2019). Conforme percebido nas empresas visitadas, os resíduos, especialmente, postes defeituosos e inutilizados, ficam depositados no pátio da empresa, expostos às intempéries, sem nenhum tratamento adequado do solo para evitar a contaminação.

Para a categoria toxicidade humana, a contaminação pode acontecer por ingestão, proveniente das emissões para águas subterrâneas e rasas, eventualmente, terminando em um corpo de água doce e afetando a saúde e o ecossistema humano, ou contato dérmico. O processo de lixiviação do solo é o que mais contribui para esse cenário, seguido pelo transporte, que gera as emissões para a atmosfera (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2015). As fontes que geram o impacto de toxicidade humana são as mesmas que contribuem para outras categorias, como acidificação terrestres e formação de oxidantes fotoquímicos, porém, nesses casos, com destaque para as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, nos processos de transporte, fabricação de cimento, mineração e geração de energia.

O impacto do esgotamento de recursos minerais está, intrinsecamente, ligado à atividade de mineração, que participa de diversos processos relacionados à produção de postes, tais como, fabricação de cimento e vergalhões de aço, geração de energia, transporte, além da extração dos insumos areia e brita. Essa categoria alcançou a terceira e quarta colocação (minerais e fósseis, respectivamente), o que pode ser explicado pela fronteira do sistema, que não considerou a produção dos recursos minerais (areia e brita), mas a entrada do insumo “pronto” na indústria. Em estudos de ACV realizados em atividades de mineração, como de ouro, por exemplo, essa

categoria aparece na primeira colocação, como sendo a que mais contribui para o impacto ambiental global (CHEN *et al.*, 2018). A mineração em pequena escala, como a de areia, gera impactos que estão mais relacionados à saúde humana do que à depleção de recursos (AGWA-EJON; PRADHAN, 2018), embora os mesmos sejam extraídos do meio ambiente.

Em relação à categoria aquecimento global, os maiores impactos são provenientes da fabricação de cimento e do processo de transporte. Isso explica-se pelas emissões de CO₂ geradas nesses processos, que impactam diretamente nas alterações climáticas provocadas pelo aquecimento global. Silva *et al.* (2019) afirmam que tipos diferentes de cimento, com diferentes teores de clínquer, podem resultar na diminuição do impacto relativo ao aquecimento global. Portanto, a escolha do tipo de cimento influencia, diretamente, no grau de impacto referente às mudanças climáticas. As distâncias percorridas pelo transporte, se diminuídas, podem, também, contribuir com a diminuição desse impacto.

Assim, os resultados desse estudo apontam que a gestão dos resíduos é um problema para essas empresas, na medida em que não é feito o tratamento adequado dos mesmos, contribuindo para a potencialização dos impactos ambientais gerados pela fabricação de postes. O transporte, também, contribui em várias categorias, indicando que a procura por insumos em localidades mais próximas das indústrias poderia levar à minimização das emissões geradas pelo deslocamento através de grandes distâncias. Por fim, a queima de combustíveis fósseis, para as atividades de produção de cimento, geração de energia, mineração e transporte, apresenta potencial participação em diversas categorias de impacto, indicando a necessidade de mudança para fontes energéticas limpas, nos diversos processos produtivos envolvidos na produção de postes de concreto.

7.4.2 Oportunidades de melhorias na gestão de transportes, resíduos e efluentes das indústrias de postes

7.4.2.1 Gestão de transportes

Nas indústrias visitadas pode-se perceber a movimentação de veículos (caminhões), tanto para o transporte interno de material, uma vez que os postes são pesados e necessitam de equipamentos apropriados para sua locomoção, como no recebimento dos insumos e entrega para instalação da rede de distribuição de energia. Todo esse processo envolve a queima de combustíveis fósseis, uma vez que os caminhões são movidos à diesel. A fronteira do sistema, adotada nesse estudo, não incluiu a fase de entrega do poste, considerando, apenas o transporte

dos insumos até as indústrias e o transporte interno para deslocamento dos postes da área de produção para a área de cura.

A distância percorrida para a entrega do cimento é de, aproximadamente, 1.200 km, pois esse insumo é obtido em outro estado (Ceará). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019), que indica onde estão localizadas as fábricas de cimento, no Brasil, existe a possibilidade de adquirir esse insumo em Fronteiras-PI, distante 420 km de Teresina, o que poderia reduzir o impacto gerado com as emissões do transporte. Em relação aos demais insumos, todos são adquiridos dentro de Teresina, com exceção da brita, que é proveniente de Monsenhor Gil-PI, cidade vizinha à Teresina. Assim, esses materiais já são obtidos do fornecedor mais próximo, cuja pequena distância não influencia, diretamente, no impacto global gerado pelo transporte de insumos, embora a brita e a areia sejam os insumos que tem a maior participação, em massa, na composição do concreto.

A formação de oxidantes fotoquímicos é uma categoria de impacto que é influenciada pelo transporte, uma vez que oxidantes fotoquímicos são poluentes secundários formados pela queima de combustíveis. São reações chamadas fotoquímicas pois ocorrem na presença de luz solar (ABDUL RAHEEM; ADEKOLA; OBIOH, 2019). O potencial de impacto dessa categoria é expresso em kg de etileno equivalente ($\text{kg C}_2\text{H}_4 \text{ eq}$). As emissões dos automóveis contribuem significativamente para a formação de *smogs* (SAYEGH; TATE; ROPKINS, 2016), tornando o transporte o principal processo que participa desse impacto. Dentre as substâncias que se destacaram na análise estão: Óxidos de Nitrogênio, Monóxido de Carbono, Dióxido de Enxofre, Benzeno e Eteno.

Outra categoria, relacionada ao transporte, cujo resultado pode ter sido influenciado pela fronteira do sistema, foi aquecimento global, uma vez que as emissões do transporte fora do portão da fábrica não foram incluídas e espera-se que as emissões atmosféricas provenientes dos veículos contribuam, consideravelmente, para esse impacto. Freitas e Paiva, 2018, em um estudo sobre as publicações brasileiras relativas a mudanças climáticas, destacaram que estas pesquisas têm se concentrado na ACV de processos, confirmando a importância de metodologias como a ACV para a busca de formas de mitigação desse impacto. O mais importante para a adaptação das empresas em relação ao aquecimento global não é, apenas, a maneira como esses impactos são percebidos, mas a sua capacidade de lidar com os mesmos (GASBARRO; PINKSE, 2016).

Algumas práticas nas organizações podem ajudar no combate às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), além da otimização em relação ao transporte. Por exemplo, em atividades internas das empresas, tais como: melhoria de produtos e processos, envolvimento dos

funcionários e dos *stakeholders*, incluindo a colaboração com parceiros da cadeia de suprimentos, divulgação e análise de inventários de emissões e projetos em conjunto, são ações que podem contribuir com a redução das emissões de GEE e, conseqüentemente, amenizar o impacto das mudanças climáticas provocadas pelo aquecimento global (LEE; KLASSEN; 2016).

Para a movimentação interna dos postes para a área de cura é percorrida uma distância de 700 metros, aproximadamente. São utilizados caminhões especiais, do tipo Munck, para a transferência dos postes para a área de cura e, depois, para a comercialização/entrega, o que é inevitável, uma vez que postes são produtos de, aproximadamente, 900 kg, que precisam de equipamentos especiais para seu manejo. Essa movimentação acarreta emissões, tanto geradas pelos combustíveis desses veículos, como por material particulado, como as poeiras, contribuindo para o impacto provocado pelo transporte, nessas indústrias.

Para reduzir o impacto dessa movimentação, uma alternativa é diminuir a distância da área de produção para a área de cura, otimizando o espaço, com melhor aproveitamento do mesmo. Outra alternativa é pensar em outro meio de transporte, como guas, pontes rolantes etc., que podem fazer o deslocamento desses materiais. Foi possível ver, nas indústrias, o acúmulo de resíduo de postes com defeito, que ficam armazenados em um local um pouco mais distante (1 km).

Para essa transferência, também, são utilizados os caminhões. A possibilidade de reciclar esse material, dentro do pátio de produção é uma alternativa, tanto para evitar o transporte interno dos postes inutilizados, como para diminuição do acúmulo de resíduos, uma vez que esses resíduos são de difícil descarte, pelo seu tamanho e peso, e acabam acumulados nas redondezas das indústrias.

7.4.2.2 Gestão de resíduos sólidos e efluentes líquidos

Nas indústrias visitadas foi possível perceber a diferença na gestão dos resíduos. A indústria A faz reaproveitamento dos restos do processo de produção de concreto no pátio do próprio estabelecimento e separa os resíduos dos vergalhões para oficinas de “ferro velho”. No entanto, os postes com deformidade ficam acumulados na empresa, sem destinação adequada. As empresas B e D não fazem nenhum tipo de gestão dos resíduos, tanto dos restos de concreto e vergalhões, como dos postes defeituosos, que ficam armazenados no pátio dessas indústrias.

A indústria C tem o melhor desempenho em relação à gestão de resíduos pois realiza ações para o reaproveitamento dos mesmos: possui um triturador para reciclar parte dos

resíduos de concreto e dos postes inutilizados, que são reaproveitados internamente, no pátio da empresa. Além disso, os restos dos vergalhões são enviados para reciclagem em oficinas de “ferro velho”. No entanto, foi possível visualizar alguns postes defeituosos, armazenados no pátio da empresa.

Os resíduos gerados na preparação do concreto, para esse tipo de indústria, são na ordem de 1% da massa produzida (YOKOTE, 2003). Para esse estudo, admite-se que o peso aproximado de um poste de 10 m de altura, com carga nominal de 400 daN, é de 900 kg, o que produz o equivalente à 9 kg de resíduo por poste fabricado. Ainda referente à produção de concreto, estima-se a geração de 0,1% de material particulado no manuseio do cimento (SOUZA, 2014). Assim, para cada saco de cimento de 50 kg, são emitidos 50 g de material particulado para o ar. Em relação aos vergalhões de aço, admite-se a perda de 40 gramas por poste (SOUZA, 2014), que são comercializados com oficinas de “ferro velho” para reaproveitamento.

O tratamento inadequado dos resíduos gerados contribui para o potencial impacto dos resultados da AICV em, praticamente, todas as categorias de impacto que sobressaíram, nesse estudo. Além da contaminação do solo, ar, águas superficiais e subterrâneas, um estudo apontou que, no Brasil (e na Índia), os resíduos gerados pelo setor da construção civil, onde as indústrias visitadas estão inseridas, contribuem, intensamente, para a proliferação de vetores como o mosquito que transmite a Dengue (NAKANO, 2017), o que impacta, diretamente, a saúde humana.

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCDs), como os das indústrias de postes, apresentam potencial de utilização em pavimentação, em substituição aos agregados naturais, no entanto, é necessário que os produtos reciclados sejam comercializáveis, o que significa que deve haver demanda regional suficiente, além de tecnologias para captação, reaproveitamento e reciclagem desse tipo de resíduo (COELHO; BRITO, 2013).

Os postes de concreto descartados têm potencial para serem utilizados, também, na confecção de pisos intertravados (*pavers*), substituindo, parcialmente, os agregados como areia e pedrisco (FERREIRA *et al.*, 2016). Os agregados reciclados podem ter custo de produção inferior ao dos agregados naturais e, ainda, promovem um ganho ambiental, pois evita a extração de matéria-prima natural (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Os RCDs possuem propriedades que geram agregados de alta qualidade, comprovados por ensaios de resistência à compressão, à tração e à flexão, bem como alguns ensaios não destrutivos, como a velocidade do pulso e os testes de martelo. A correlação entre os resultados obtidos nos diferentes testes foi analisada confirmando a qualidade dos agregados formados por

resíduos de fontes diversas (KABIR; AL-SHAYEB; KHAN, 2016), incluindo os gerados nas indústrias que fabricam postes

A regulamentação sobre o uso de RCDs, no Brasil, está descrita na Resolução 307, de 5 de julho de 2002, do CONAMA, que estabelece as diretrizes, os critérios e os procedimentos para a gestão desses resíduos, com o objetivo de promover a redução, reutilização ou reciclagem dos mesmos. A Resolução estabelece a classificação dos resíduos de acordo com o tipo, em categorias, para o seu melhor aproveitamento e legisla sobre a sua deposição: não podem ser depositados em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei (BRASIL, 2002).

O crescimento do uso desse tipo de agregado reciclado pode ser impulsionado pelo menor consumo de energia e gasto com transporte, uma vez que os mesmos podem ser produzidos dentro da própria obra, conforme observado nas indústrias visitadas. Um estudo envolvendo a ACV de RCDs destaca que a reciclagem é benéfica quando ocorre uma triagem eficiente nos canteiros de obras, evitando o transporte para outras instalações de reciclagem, o que pode garantir que os processos de tomada de decisão sejam baseados em aspectos técnicos e ambientais, e não apenas em fatores econômicos e políticos (PENTEADO; ROSADO, 2016).

No entanto, outro estudo envolvendo ACV de RCD comprovou que reutilizar ou reciclar no local é a estratégia menos aplicada. No mesmo estudo, afirma-se que o aspecto principal quando a ACV é utilizada para avaliar os sistemas de gerenciamento de RCD é a necessidade de normalizar quais processos incluir nos limites do sistema e na unidade funcional, o uso de dados de inventário adaptados ao contexto do estudo e a definição de um conjunto comum categorias de avaliação de impacto apropriadas. Além disso, é importante obter resultados desagregados por processos unitários, que permitam a comparação entre estudos (BOVEA; POWELL, 2016).

Evangelista, Costa e Zanta (2017) desenvolveram um estudo sobre reciclagem de materiais em canteiro de obras concluindo que até 80% do volume de resíduos se converteu em agregado reciclado, que substitui a utilização de agregado natural. No entanto, é necessário avaliar e utilizar métodos apropriados em projetos que visam a redução, reutilização e reciclagem de resíduos de construção, considerando as inter-relações das possíveis estratégias de projetos em diferentes cenários (WANG; LI; TAM, 2015), a fim de identificar as melhores práticas e tecnologias que possam, efetivamente, contribuir tanto com a redução dos impactos ambientais, como na promoção de benefícios econômicos para a indústrias.

Observa-se, portanto, que existem alternativas para o uso dos resíduos da construção, o que deve ser incentivado e aplicado nas indústrias pesquisadas. Uma opção para incentivar essas

ações é promover parcerias com prefeituras e órgãos ou empresas interessadas que possam coletar o material ou, até mesmo, estabelecer uma cooperação para a reciclagem dentro das indústrias, evitando o impacto com deslocamento. Embora uma das indústrias possua um triturador para os postes defeituosos e haja algum tipo de ação de reaproveitamento dos resíduos de concreto e dos vergalhões, ainda existe a necessidade de uma melhor gestão para que esse material possa ter um tratamento adequado, contribuindo, assim, para a diminuição do impacto ambiental e na saúde, resultante desse acúmulo.

Em relação ao reaproveitamento de efluentes, não foi possível saber o volume exato de águas de descarte, na área de cura, mas estima-se que, aproximadamente, 73 litros diários são desperdiçados, sem nenhum aproveitamento. A estimativa de geração de efluentes, na produção de concreto, foi feita com base em Barreto (2015). Após a concretagem, os postes ficam no molde, e precisam ser umidificados, o que pode ser feito por meio de aspersores de água, que são ligados periodicamente, ou mantas umedecidas com auxílio de baldes ou mangueiras, durante 7 dias, até atingir a cura inicial. Essa etapa é importante para que o concreto atinja a qualidade estabelecida nas normas específicas, que garantem o padrão para postes que sustentam redes de energia, a fim de evitar acidentes.

Durante esse processo de umidificação, a água excedente cai no chão, juntamente com resíduos do concreto, sendo absorvida pelo solo. A possibilidade de construir uma canaleta, que pudesse coletar esses efluentes, encaminhando para um reservatório, para reaproveitamento, é uma medida que contribuiria para evitar, tanto o impacto de esgotamento de recursos hídricos, como para todos os outros relacionados às contaminações do solo e lençol freático.

O efluente coletado poderia passar por um processo simples de decantação para retirada das maiores impurezas e essa água poderia ser reaproveitada para o próprio processo de cura, que não exige o uso de água tratada, uma vez que não há contato direto da mesma com os postes (que estão cobertos pela manta de umidificação), desde que não contenha qualquer tipo de contaminante que possa prejudicar o processo de cura. Essa água, parcialmente, tratada pode, também, ser utilizada para lavagem de veículos, equipamentos e o pátios da empresa, evitando o uso de água “limpa” para esse fim.

7.5 Conclusão

A aplicação da ACV possibilitou a identificação de alguns dos diversos potenciais impactos ambientais negativos associados à produção de postes de concreto, que podem ser provenientes dos diferentes processos que fazem parte do ciclo de vida desse produto. Dentre

as categorias de impacto que mais se destacaram, de acordo com o processo de normalização adotado, pode-se citar a de ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, aquecimento global, depleção de recursos abióticos (minerais e fósseis) e acidificação.

Não foram encontrados, na literatura, estudos que abordem a produção de postes na mesma perspectiva dessa pesquisa, o que inviabiliza a comparação entre os resultados. Para que os resultados das categorias de impacto possam ser comparáveis é necessário que os estudos tenham a mesma unidade funcional, utilizem o mesmo método de AICV e um conjunto de dados semelhante. Se um ou mais desses parâmetros for diferente, a comparação fica inviável. No entanto, os estudos apontam uma tendência de correlação para indicadores de ecotoxicidade em ACV, em pesquisas dessa natureza.

Os processos que contribuem para os impactos nas categorias referentes à ecotoxicidade, toxicidade humana e acidificação indicam que as emissões para solo, água e ar, na fabricação de postes, são altamente impactantes, na região em estudo. A disposição final dos resíduos destaca-se como fonte de impactos negativos o que confirma a importância da gestão eficiente desses materiais, tanto no final da vida útil, como no descarte durante o processo produtivo. Adotar procedimentos de reciclagem dos resíduos e reaproveitamento de efluentes é um dos caminhos para reduzir esses impactos. No entanto, a exequibilidade da adoção de tais procedimentos precisa ser adequadamente estudada para que não afete a segurança e a economicidade, sem ganhos expressivos de melhores indicadores ambientais

O impacto com aquecimento global é relevante para indústrias dessa natureza pelos processos produtivos envolvidos no ciclo de vida da fabricação de postes. As emissões de GEE provenientes da produção de cimento, geração de energia e produção de vergalhões de aço são alguns exemplos do potencial impacto para o aquecimento global e para as mudanças climáticas. O transporte, também, representa alto impacto à medida que os insumos, como o cimento, são adquiridos de fornecedores localizados a grandes distâncias das indústrias. Os resultados reforçam a afirmação do estudo de Silva *et al.* (2020b), sobre a variabilidade de fornecedores, no âmbito do Brasil. A busca por fornecedores mais próximos é uma estratégia que pode reduzir os impactos com emissões atmosféricas provenientes dos caminhões.

As maiores incertezas do estudo foram verificadas para as categorias ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana, possivelmente, conseqüentemente, gerando alto coeficiente de variação nessas categorias de impacto. O uso de alguns dados secundários não regionalizados (brasileiros) e estimados pode ser uma das razões para a incerteza nessas categorias, reforçando a necessidade de aprofundar a construção de base de dados primários, com maior qualidade, para reduzir incertezas. Ampliar a fronteira do sistema para berço ao túmulo, com a modelagem

de dados primários que representem melhor a realidade da área em estudo, é uma das opções para reduzir as incertezas. Na versão do Ecoinvent, utilizada nesse estudo (Ecoinvent 3.7.1), muitos dados são regionalizados para o Brasil, o que ajuda a reduzir as incertezas.

Essa pesquisa contribui com estudos de ACV aplicados a produção de postes de concreto, no setor da construção civil, gerando subsídios para que essas indústrias possam melhorar seus processos produtivos dentro e fora do sistema de produto. As ferramentas teóricas já existem, como demonstrado nesse trabalho, No entanto, é necessário sempre mais pesquisa e dados locais para aprimorar a gestão do ciclo de vida de postes de concreto armado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEPI ((Edital FAPEPI / MCT/ CNPq N° 007/2018 - Programa de Infra-Estrutura para Jovens Pesquisadores / Programa Primeiros Projetos - PPP) e ao CNPq pelo financiamento dos projetos de pesquisa [401320/2016-2] e [422087/2018-1] e o pesquisador JMMN agradece ao CNPq pelo financiamento através da Bolsa de Produtividade em Pesquisa [304974/2018-8].

Referências

ABDUL RAHEEM, A. M. O.; ADEKOLA, F. A.; OBIOH, I. B. Environmental Monitoring of NOX, Total Oxidants and the Implications for Photochemistry of Air Pollution over Ilorin Shed, Nigeria. **Journal of Chemistry and Biochemistry**, v 7, n 1, p. 1-14, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8451-1:2011. **Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 15688:2013. **Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR ISO 14040:2014. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR ISO 14044:2014 **Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014a.

ACV-IBICT. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2019. Disponível em: http://ontologia.acv.ibict.br/data/M3_toxicidade_humana_oacv.html#M3_toxicidade_humana_unep. Acesso em 25 fev 2020.

AGWA-EJON, J. F.; PRADHAN, A. Life cycle impact assessment of artisanal sandstone mining on the environment and health of mine workers. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 72, p. 71-78, 2018

BARRETO, L. P. G. L. **O estudo da água real e virtual no concreto usinado**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

BOLIM, C. A.; SMITH, S. T. Life cycle assessment of pentachlorophenol-treated wooden utility poles with comparisons to steel and concrete utility poles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2475–2486, 2011.

BOVEA, M. D.; POWELL, J. C. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. **Waste Management**, v. 50, p. 151-172, 2016

BUENO, C.; HAUSCHILD, M. Z.; ROSSIGNOLO, J. A.; OMETTO, A. R.; MENDES, N. C. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208-2220, 2016.

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

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 307**, de 05 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em 01 mar 2020.

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

CABEZAS, J.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, T.; GÓMEZ-GALÁN, J. A.; CIFUENTES, H.; CARVAJA, R. G. Compact Embedded Wireless Sensor-Based Monitoring of Concrete Curing. **Sensors**, v. 18, n. 876, p. 2-17, 2018.

CAMPOS, L. C. R.; MACEDO, A. S.; LOPES, D. M. Sistemas de redes subterrâneas de energia elétrica no Brasil. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 1, p. 151-169, 2019

CAMPOS, P. B. R.; ELMIRO, M. A. T.; NOBREGA, R. A. A. A utilização da modelagem ambiental para sistematização do conhecimento tácito: identificação de corredores preferenciais para linhas de transmissão de energia elétrica. **Boletim de Ciências Geodésicas** v. 20, n. 4, p. 765-783, 2014.

CERQUEIRA, D. P.; PORTELLA, K. F.; PORTELLA, G. D. O. G.; CABUSSÚ, M.; MACHADO, E. C.; DA SILVA, G. C.; BRAMBILLA, K. J. C.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, D. R.; SALLES, R. N.; PEREIRA, P. A. M.; HENKE, S. L.; INONE, P. C.; RIBEIRO JÚNIOR, S. Deterioration rates of metal and concrete structures in coastal environment of the South and Northeast Brazil: case studies in the Pontal do Sul, PR, and Costa do Sauípe, Bahia. **Procedia Engineering**, v. 42, p. 384-396, 2012.

CHEN, A. E.; DAI, K. Modal characteristics of two operating power transmission poles. **Shock and Vibration**, v. 17, p. 551–561, 2010.

CHEN, W.; GENG, Y.; HONG, J.; DONG, H. CUI, X.; SUN, M.; ZHANG, Q. Life cycle assessment of gold production in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, n. 1, p. 143-150, 2018.

COELHO, A.; BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 338-352, 2013.

COSTA, C. R.; OLIVI, P.; BOTTA, C. M. R.; ESPINDOLA, E. L. G. A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química Nova**, v. 31, n. 7, p. 1820-1830, 2008.

ECOINVENT. New Data in Ecoinvent 3.7.1. 2021. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-37/new-data-in-ecoinvent-37/new-data-in-ecoinvent-37.html> Acesso em 10 jan 2021.

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 3, p. 23-40, 2010.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP. **Mapa da Construção**. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/infografico-cadeia-da-construcao/> Acesso em 04 mar 2020.

FERREIRA, G. C.; SHIROMA, L.; BERALDO, A. L. OSPINA, M. T. Caracterização de resíduos da reciclagem de postes de concreto e sua utilização na fabricação de pisos intertravados. In: II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2016. **Anais...** João Pessoa: 2016. p.1-13.

FIORI, S.; CYBIS, L. F. A.; FERNANDES, V. M. F. Metodologia ACV para caracterizar impactos ambientais relacionados a diferentes cenários de uso de água em edificações. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n.4, pp. 186-194, 2014.

FREITAS, A. R. P.; PAIVA, L. E. B. Revisão da produção científica internacional de brasileiros acerca das mudanças climáticas. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 95-113, 2018.

FUJIMOTO, N.; HIGASHI, Y.; SAWADA, T. Corrosion Mechanism of Steel Bars in Concrete Poles. **Zairyo-to-Kankyo**, v. 64, n. 6, p. 231-234, 2015.

FUNAMOTO, K. Experimental study on effect of lateral restriction of high strength prestressed concrete pole about bending deformation performance. **Journal of Technology and Design**, v. 20, n. 46, p.971-974, 2014.

GASBARRO, F.; PINKSE, J. Corporate adaptation behaviour to deal with climate change: the influence of firm-specific interpretations of physical climate impacts. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 23, n. 3, p. 179-192, 2016.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; ZELM, R. v. 2013. **ReCiPe 2008**. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. 2013. Disponível em: https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf. Acesso em 05 mar 2020.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJE, L. 2016. **Introduction to LCA with SimaPro**. Disponível em: <https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>. Acesso em 17 abr 2020.

GOUVEIA, B. M.; COSSI, A. M. Um estudo sobre redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica. **Sciencult**, v. 4, n. 1, p. 29-36, 2013.

GREGORY, J. R.; MONTALBO, T. M.; KIRCHAIN, R. E. Analyzing uncertainty in a comparative life cycle assessment of hand drying systems. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 8, p. 1605-1617, 2013.

HACKENHAAR, I. C.; WASKOW R. P.; TUBINO R.; PASSUELLO A. Life Cycle Assessment applied to construction and demolition waste treatment: proposal of a Brazilian scenario. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, p. 1-10, 2019.

IBRAHIM, A. M.; DAMATTY, A. A. E.; ANSARY, A. M. E. Finite element modelling of pre-stressed concrete poles under downbursts and tornadoes. **Engineering Structures**, v. 153, p. 370–382, 2017.

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

IPCC- The Intergovernmental Panel on Climate Change. **Documentation**. 2020. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/documentation/>. Acesso em 31 out 2020.

KABIR, S.; AL-SHAYEB, A.; KHAN, I. M. Recycled Construction Debris as Concrete Aggregate for Sustainable Construction Materials. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 1518-1525, 2016.

KIM, T. H.; TAE, S. H. Proposal of Environmental Impact Assessment Method for Concrete in South Korea: An Application in LCA (Life Cycle Assessment). **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 13, p. 1-16. 2016.

LASVAUX, S.; ACHIM, F.; GARAT, P.; PEUPORTIER, B.; CHEVALIER, J.; HABERT, G. Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters? **Ecological Indicators**, v. 67, p. 174-182, 2016.

LEE, S. Y.; KLASSEN, R. D. Firms' response to climate change: the interplay of business uncertainty and organizational capabilities. **Business Strategy and the Environment**, v. 25, n. 8, p. 577-592, 2016.

- LU, H. R.; HANANDEH, A, E. Environmental and economic assessment of utility poles using life cycle approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 4, p. 1047–1066, 2016.
- MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 365-385, 2018
- 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.
- MILANI, C. J.; BOESING, R.; PHILIPPSEN, R. A.; MIOTTI, L. A. Processo produtivo de elementos pré-moldados de concreto armado: detecção de manifestações patológicas. **Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, v. 1, p. 82-91, 2012.
- MORALES, M. F. D.; REGULY, N.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELLO, A. C. Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 1-11.
- NAKANO, K. Future risk of dengue fever to workforce and industry through global supply chain. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 23, p. 433–449, 2018.
- ONU. Organização das Nações Unidas. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2020. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em 10 mar 2020.
- OpenLCA. **Data**. 2020. Disponível em <https://www.openlca.org/lca-data/>. Acesso em 07 mar 2020.
- PASSUELO, A. C.; VENQUIARUTO, S.; ABREU, A. G.; ZANINI, C.; DOMINGUEZ, A. O.; KIRCHHEIM, A. P.; DAL MOLIN D, MASUERO, A. Valorização de resíduos de ágata em argamassas e concretos: avaliação do ciclo de vida. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, p. 1-13, 2019.
- PENTEADO, C. S. G.; ROSADO, L. P. Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 10, p. 1026-1035, 2016.
- PESSARELLO, R. G. Estudo exploratório quanto ao consumo de água na produção de obras de edifícios: avaliação e fatores influenciadores. 2008. Monografia (Especialização em Tecnologia e Gestão da Produção de Edifícios) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- POMPONI, F.; D’AMICO, B.; MONCASTER, A. M. A Method to Facilitate Uncertainty Analysis in LCAs of Buildings. **Energies**, v. 10, n. 4, p. 1-15, 2017.
- PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Database Manual**. Methods library. Version 4.14.2. 2019, 75p.

RAMOS, T.P.A.; RAMOS, R.T.C.; RAMOS, S.A.Q.A.; Ichthyofauna of the Parnaíba river Basin, Northeastern Brazil. **Biota Neotropica**, v. 14, n.1, p.1-8, 2014.

ROBERTS, E. E.; LEES, J. M.; HOULT, N. A. Flexural Fatigue Performance of CFRP Prestressed Concrete Poles. **Advances in Structural Engineering**, v.15, n. 4, p. 575-588, 2017.

RODRIGUES, E. M.; NUNES, R. V.; ADRIANO, N. A. A simulação de Monte Carlo como instrumento para a análise econômico-financeira em investimentos de risco - O caso de uma decisão de investimento na abertura de uma filial para revenda de equipamentos pesados no Estado do Ceará. In: XV Congresso Brasileiro de Custos, 2010. **Anais...** Belo Horizonte: 2010, p. 1-15.

SAYEGH, A; TATE, J. E.; ROPKINS, K. Understanding how roadside concentrations of NO_x are influenced by the background levels, traffic density, and meteorological conditions using Boosted Regression Trees. **Atmospheric Environment**, v. 127, p. 163-175, 2016.

SEDGWICH, P. Standard deviation or the standard error of the mean. **BMJ (online)**, v. 350, 2015.

SILVA, F. B.; OLIVEIRA, L. A.; YOSHIDA, O. S.; JOHN, V. M. Variability of environmental impact of ready-mix concrete: a case study for Brazil. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, p. 1-9, 2019.

SILVA, F. B.; REIS, D. C.; MACK-VERGARA, Y. L.; PESSOTO, L.; FENG H.; PACCA, S. A.; LASVAUX, S.; HABERT, G.; JOHN, V. M. Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. The **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 980–997, 2020a.

SILVA, F. B.; SAADE, M. R. M.; MORAGA, G. L.; YOSHIDA, O. S.; GOMES, V.; PASSUELO, A., OLIVEIRA, L. A.; SILVA, M. G.; JOHN, V. Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. **Concreto & Construções**, Ed. 98, p. 91-97, 2020.

SILVA, F. B.; YOSHIDA, O. S.; ARDUIM, R. H.; VINHAL, L. D.; TEIXEIRA, C. E.; OLIVEIRA, L. A. Análise comparativa de procedimentos para a estimativa de incertezas em ACV: um estudo baseado na produção de blocos cerâmicos de alvenaria. **LALCA Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, Edição Especial V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, p. 63-77, 2016.

SILVA, F. B.; YOSHIDA, O. S.; DIESTELKAMP, E. D.; OLIVEIRA, L. A. Is it relevant to include capital goods in the life cycle assessment of construction products? In: VI Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, 2018, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: IBICT, 2018. p. 711-724.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2019. Fábricas no Brasil. Localizações. Disponível em: <http://snic.org.br/fabricas-localizacoes.php>. Acesso em 03 mar 2020.

- SOUZA, H. H. S. Avaliação do ciclo de vida e influência do tempo de vida útil dos postes de madeira e concreto do sistema de distribuição de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 159, 2014.
- SOUZA, H. H. S, LIMA, A. M. F.; ESQUERRE, K. O.; KIPERSTOK, A. Life cycle assessment of the environmental influence of wooden and concrete utility poles based on service lifetime. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 2030–2041, 2017.
- SLAPNIK, M.; ISTENIC, D.; PINTAR, M.; UDOVC, A. Extending life cycle assessment normalization factors and use of machine learning – a Slovenian case study. **Ecological Indicators**, v. 50, p. 161-172, 2015.
- STEUBING, B.; WERNET, G.; REINHARD, J.; BAUER, C.; MORENO-RUIZ, E. The Ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 21, p. 1269-1281, 2016.
- TSUNEMOTO, M.; SHIMIZU, M.; KONDO, Y.; KUDO, T.; UEDA, H.; IJIMA, T. Replacement criteria for concrete catenary poles. **Quarterly Report of Railway Technical Research Institute**, v. 58, n. 4, p. 270-276.
- WANG, J.; LI, Z.; TAM, V. W. Y. Identifying best design strategies for construction waste minimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 237-247, 2015
- WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories – an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p. 167-174. 1996.
- WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER R, MUTEL C, NEMECEK T, REINHARD J, VADENBO C O, WERNET G. Overview and methodology: Data quality guideline for the Ecoinvent database version 3 **Ecoinvent Report**, v. 3, n. 1, 2013. 169p.
- WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016.
- YOKOTE, A. Y. Inventário do ciclo de vida da distribuição de energia elétrica no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 344, 2003.
- YUAN, Y.; JIANG, J. Climate load model – Climate action spectrum for predicting durability of concrete structure. **Construction and Building Materials**, v. 29. P. 291-298, 2012.

8 OTIMIZAÇÃO AMBIENTAL NO LIMITE DA COMPETITIVIDADE: O PAPEL DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE¹⁴

Resumo

Todas as atividades industriais geram impacto no meio ambiente, devendo o governo conhecê-los para regulá-las na proporcionalidade das alternativas para a mitigação dos impactos ambientais negativos gerados. As indústrias da construção civil, como concreteiras e fábricas de postes, estão diretamente ligadas a construção de moradias e infraestrutura, sendo necessárias a sociedade. No entanto, geram diversos impactos ambientais negativos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que possibilita a mensuração desses impactos ambientais para auxiliar a tomada de decisão em relação à mitigação dos mesmos. É parte constitutiva dos métodos quantitativos a determinação da influência de variações nos pressupostos, métodos e dados, visando garantir a qualidade dos resultados alcançados. Uma virtude da análise de sensibilidade dos resultados, relativo aos parâmetros/variáveis de entrada, é a possibilidade de prever outros cenários de resultados pela modificação nesses parâmetros. Nesse estudo foi realizada a análise de sensibilidade para a produção de concreto e de postes, com base nos dados reais coletados em concreteiras e indústrias de postes. Posteriormente, foram definidos cenários com alteração de alguns parâmetros: (1) reaproveitamento dos resíduos sólidos e efluentes líquidos, (2) simulação de diferentes distâncias de transporte dos insumos, (3) substituição da sílica ativa por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e (4) redução do teor de cimento na mistura do concreto. A partir da construção de dois cenários viáveis economicamente (cenário 1, com os dados coletados em campo e cenário 2, simulando a alteração de alguns dados) os resultados indicaram que a variação dos parâmetros (cenário 2) resultou em diminuição dos potenciais impactos para todas as categorias do CML (um dos métodos de avaliação de impacto ambiental usados em ACV), para a produção de concreto, com destaque para a depleção de recursos abióticos (minerais), chegando a 67% de redução. Para o estudo dos postes, a alteração dos parâmetros (cenário 2) foi pouco representativa. Houve decréscimo relevante, apenas, nas categorias depleção da camada de ozônio e aquecimento global, com índices pouco maiores do que 10%. Há ganhos econômicos com o cenário 2, para ambos os produtos (concreto e postes), tanto com a reutilização de resíduos, como com o encurtamento das distâncias (menor consumo de combustível). A existência de dados consistentes de análise de sensibilidade permite a criação de diversos cenários, com melhor desempenho ambiental, para os quais a empresa pode optar por aquelas alternativas que não afetem a qualidade e nem a competitividade do produto.

Palavras-chave: Ciclo de Vida. Produtos de concreto. Impactos ambientais.

Abstract

All industrial activities impact the environment. The government must know and regulate them proportionally to the alternatives for mitigating these negative environmental impacts. The civil construction industries, such as concrete and poles factories, are necessary to society once they are directly linked to the construction of housing and infrastructure. However, they generate several negative environmental impacts. The Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology that allows the measurement of these impacts to assist decision making regarding their mitigation. To determine the influence of variations in assumptions, methods, and data is a constitutive part of quantitative methods to guarantee the results quality. An advantage of the results' sensitivity analysis is the possibility of predicting other scenarios by modifying

¹⁴ Artigo submetido ao periódico *The International Journal of Life Cycle Assessment* em 24/05/2021. Em 19/07/2021 o status do mesmo é "em avaliação"

parameters. In this study, a sensitivity analysis was performed for the concrete and pole production, based on real data collected in concrete companies and pole industries. Subsequently, another scenario was defined with alteration of some parameters: (1) reuse of solid waste and liquid effluents, (2) simulation of different distances, (3) replacement of activated silica with sugarcane bagasse ash, and (4) reduction of cement content in the concrete mixture. From the construction of two economically viable scenarios (scenario 1 with the data collected in the field and scenario 2 simulating the alteration of some data) the results indicated that the parameters' variation (scenario 2) resulted in a potential impacts reduction for all CML categories (one of the environmental impact assessment methods used in LCA), for the production of concrete, with emphasis on the abiotic depletion (mineral), reaching 67% reduction. For the pole study, the alteration in the parameters (scenario 2) was not representative. There was a significant decrease, only, in the ozone layer depletion and global warming categories, with rates slightly higher than 10%. There are economic gains with scenario 2, for both products with the reuse of waste and distances' shortening (less fuel consumption). The environmental impact reduction points to significant gains when considering a year of industrial activity (the amount of CO₂ no longer emitted into the atmosphere, for example). The proposed scenario is technically feasible, the product' quality was not compromised, and it is economically favorable. The existence of consistent sensitivity analysis data allows the creation of several scenarios, with better environmental performance. The industry can choose alternatives that do not affect its product quality or competitiveness.

Keywords: Life cycle. Concrete products. Environmental impacts.

8.1 Introdução

O concreto é um dos materiais mais consumido no mundo. Segundo o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2018), globalmente, são consumidas, aproximadamente, 11 bilhões de toneladas de concreto por ano. Desse total, cerca de 30 milhões de metros cúbicos, por ano, saem das centrais dosadoras brasileiras. O concreto de cimento Portland é um produto básico da indústria da construção civil, sendo formado por: 42% de agregado graúdo (brita), 40% de agregado miúdo (areia), 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos (LUZ; ALMEIDA, 2012). Essa proporção é comum nos traços de concreto usualmente empregados no setor.

O poste de concreto armado é um produto da construção civil formado por uma armação de aço e por concreto. É uma estrutura pré-fabricada para sustentação de redes aéreas de distribuição de energia elétrica, iluminação pública, entre outras finalidades. A sociedade depende cada vez mais de energia elétrica, tornando o poste um elemento fundamental, uma vez que proporciona condições para a instalação de redes distribuidoras de energia, por meio da sustentação das mesmas.

Essas indústrias (concreteiras e fábricas de postes), embora necessárias para a boa qualidade de vida da população, em função da produção de elementos que são utilizados em construções e obras de saneamento básico e infraestrutura, geram diversos impactos ambientais negativos, tais como: emissões atmosféricas, geração de material particulado e ruído, supressão da vegetação para a construção da indústria, produção de resíduos e efluentes, entre outros (INGRAO *et al.*, 2014). Além desses, existem os impactos desde a extração da matéria-prima, como areia e brita, até as emissões de combustível no trajeto da entrega do material ao consumidor final (KIM; TAE, 2016).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que possibilita a avaliação de potenciais impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços, para auxiliar a tomada de decisão em relação à mitigação dos mesmos. Os impactos são avaliados desde a aquisição da matéria-prima, passando pela produção, pelo uso e pela disposição final (ABNT, 2014). Por meio do conhecimento das etapas mais impactantes em um processo produtivo é possível simular cenários que proporcionem a redução de impactos ambientais

Uma das etapas da ACV é a análise de sensibilidade que busca determinar a influência de variações nos pressupostos, métodos e dados sobre os resultados obtidos. Embora seja um elemento opcional, é pertinente para comparar os resultados do estudo com outros provenientes da alteração de dados (ABNT, 2014a). Dessa forma, por meio da análise de sensibilidade é possível construir o cenário mais próximo do ideal, onde haja redução de impactos ambientais para determinados processos, produtos ou serviços.

Nesse estudo foi feita a análise de sensibilidade para a produção de concreto e de postes com base nos dados coletados em concreteiras e indústrias de fabricação de postes, com alteração de alguns parâmetros: distância percorrida pelos insumos até as indústrias, reuso de efluentes, substituição da sílica ativa por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC), redução do teor de cimento na mistura do concreto e reaproveitamento de resíduos (esse último apenas para as indústrias de poste). O objetivo foi verificar se a alteração de determinados parâmetros influencia no comportamento ambiental desses produtos, a fim de encontrar o cenário que promova menor impacto ambiental e benefícios econômicos.

8.2 Metodologia

Os dados utilizados nesse estudo foram coletados em visitas realizadas a três concreteiras e quatro indústrias de fabricação de postes de concreto armado, localizadas em Teresina, Piauí, Brasil. Foram colhidas todas as informações necessárias para a construção do

Inventário do Ciclo de Vida (ICV), o qual visa identificar as entradas e saídas de um processo produtivo: quantidade e tipo de insumos utilizados, consumo de combustível, energia e água; descrição técnica e de operação de máquinas e equipamentos; quantidade e tipo de resíduos produzidos; traço dos concretos utilizados; entre outros. Os dados secundários foram obtidos na literatura científica e em relatórios especializados do setor.

A unidade funcional definida para o concreto é um metro cúbico (1 m³) de concreto e o valor do fluxo de referência é a produção média mensal de 2.993,17 m³. Para o poste, a unidade funcional foi definida como um poste do tipo Duplo T, de 10 m de altura, carga nominal de 400 daN e, aproximadamente, 900 kg e o fluxo de referência é a produção de 1.750 postes por mês.

Quanto à cobertura temporal, a coleta de dados teve como referência o ano de 2017 para as concreteiras e 2018 e 2019 para as indústrias de postes. Quanto à cobertura geográfica, o estudo foi realizado em indústrias localizadas em Teresina, estado do Piauí, na região Nordeste do Brasil. Em relação à cobertura tecnológica, refere-se ao processo produtivo comumente utilizado em usinas de concreto (BORGES *et al.*, 2014; NEVILLE, 2016; BRAGAGNOLO, KORF, 2020) e em fabricação de estruturas pré-moldadas de concreto armado brasileiras (MILANI *et al.*, 2012; SOUZA, 2014). A fronteira do sistema é berço a portão da atividade industrial para ambos os estudos, complementado, à montante, o transporte de insumos até a indústria (para ambos) e à jusante, o transporte de produtos ao consumidor final (para o concreto, apenas).

A modelagem foi realizada no OpenLCA 1.8, *software* gratuito, de código aberto, amplamente usado para estudos de ACV (OpenLCA, 2020). A base de dados utilizada, gratuita para pesquisadores de instituições educacionais de países não-membros da OCDE, foi o Ecoinvent 3.7.1 *Cut-Off unit regionalized*. O método de AICV adotado foi o CML (*baseline*), que apresenta as seguintes categorias de impacto: depleção da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, de água doce e marinha, depleção de recursos abióticos (fósseis e minerais), eutrofização, oxidação fotoquímica (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2016).

Para o estudo do poste, adotou-se o procedimento de alocação física para os resíduos. A alocação consiste na distribuição proporcional dos fluxos de entradas ou saídas de um processo ou sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas de produto (ABNT, 2014a), isto é, a divisão dos encargos (ou cargas) ambientais de processos multifuncionais. O resíduo de um processo produtivo, quando não aproveitado, tem carga ambiental zero nessa alocação e o produto que o gerou tem todo o ônus de sua carga ambiental negativa (100%). À medida que tal resíduo é incorporado numa produção, a alocação começa

a tratá-lo como um subproduto e a ele, agora como insumo de outro processo, é conferido uma carga ambiental, reduzindo daquele produto gerador inicial. Portanto, a alocação é dinâmica e garante que sempre a carga ambiental negativa está sobre algum material ou produto.

O processo de reciclagem é multifuncional, pois contribui com o tratamento de resíduos para o sistema de produto, à montante, e como fornecedor de insumos para o sistema de produto, à jusante (ALLACKER *et al.*, 2014). No caso das indústrias de postes, o sistema de produto é fechado (*closed-loop*), isto é, o material proveniente do sistema de produto é reciclado no mesmo sistema de produto.

8.2.1 Análise do inventário do ciclo de vida do poste e do concreto

Para a etapa de ICV, os dados referentes às entradas e saídas (água, energia, insumos, produtos, resíduos e efluentes) foram contabilizados de forma agregada, conforme fornecidos pelos gestores das indústrias. Foram alterados alguns parâmetros para simular o comportamento ambiental do concreto e do poste (Tabelas 1 e 2). Na coluna Cenário 1 estão os dados obtidos a partir da pesquisa direta e na coluna Cenário 2, os dados alterados em função da simulação proposta.

Tabela 1 – Inventário do Ciclo de Vida da produção de concreto

<i>Inputs</i>				
Fluxo	Cenário 1	Cenário 2	Un	Provedor
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	5725.82	2700.52	t*km	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW</i>
<i>tap water</i>	122.401219	125.801259	kg	<i>market for tap water tap water Cutoff, U - BR</i>
<i>sand</i>	998.319067	998.319067	kg	<i>market for sand sand Cutoff, U - BR</i>
<i>plasticiser, for concrete, based on sulfanated melamine formaldehyde</i>	2.133661	2.133.661	kg	<i>market for plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde Cutoff, U - GLO</i>
<i>activated silica</i>	8.670319	-	kg	<i>market for activated silica activated silica Cutoff, U - GLO</i>
<i>ash, from combustion of bagasse from sugarcane</i>	-	54.505901	kg	<i>market for ash, from combustion of bagasse from sugarcane ash, from combustion of bagasse from sugarcane Cutoff, U - GLO</i>
<i>gravel, crushed</i>	949.28	949.28	kg	<i>market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, U - BR</i>
<i>electricity, medium voltage</i>	1.799321	1.799321	kWh	<i>electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-North-eastern grid</i>
<i>cement, Portland</i>	272.529505	218.023604	kg	<i>cement production, Portland cement, Portland Cutoff, U - BR</i>
<i>diesel</i>	2.22842	222.842	kg	<i>market for diesel diesel Cutoff, U - BR</i>

<i>Outputs</i>		
Fluxo	Quant.	Unid.
<i>Concrete</i>	1	m ³
<i>Particulates, fine mineral fibers</i>	0.27252919	g
<i>Waste concrete</i>	24.9999833	kg
<i>Wastewater from concrete production</i>	3.40004076	l

Fonte: Autores

Os dados alterados foram: distância percorrida pelos insumos até as indústrias, reuso de efluentes líquidos, substituição da sílica ativa por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC), diminuição do teor de cimento no traço do concreto (para ambos os estudos) e reaproveitamento de resíduos sólidos (para o estudo dos postes).

Tabela 2 – Inventário do Ciclo de Vida da produção de postes

<i>Inputs</i>				
Fluxo	Quant. 1	Quant. 2	Un	Provedor
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	623.28	206.2762	t*km	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW</i>
<i>tap water</i>	37.50	38.75140	kg	<i>market for tap water tap water Cutoff, U - BR</i>
<i>Sand</i>	121.50	91.125	kg	<i>market for sand sand Cutoff, U - BR</i>
<i>reinforcing steel</i>	40.20	40.2	kg	<i>market for reinforcing steel reinforcing steel APOS, U - GLO</i>
<i>lubricating oil</i>	100	100	g	<i>market for lubricating oil lubricating oil APOS, U - RoW</i>
<i>gravel, crushed</i>	145.8	109.35	kg	<i>market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, U - BR</i>
<i>electricity, medium voltage</i>	2.219	2.219	kWh	<i>electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-North-eastern grid</i>
<i>cement, Portland</i>	75	60	kg	<i>cement production, Portland cement, Portland Cutoff, U - BR</i>
<i>ash, from combustion of bagasse from sugarcane</i>	-	15	kg	<i>market for ash, from combustion of bagasse from sugarcane ash, from combustion of bagasse from sugarcane Cutoff, U - GLO</i>
<i>Waste concrete</i>	-	66.825	kg	-

<i>Outputs</i>		
Fluxo	Quant.	Unid.
<i>Pole</i>	1	Item(s)
<i>Particulates, fine mineral fibers</i>	0.075	g
<i>Waste concrete</i>	9.0	kg
<i>Waste reinforcement steel</i>	40.0	g
<i>Wastewater from concrete production</i>	1.25140	l

Fonte: Autores

Para a escolha dos *inputs* e *outputs*, disponíveis no banco de dados do Ecoinvent 3.7.1, foram consideradas as características do inventário do processo produtivo em estudo. Uma crítica pertinente ao uso de dados secundários em pesquisa dessa natureza é a utilização de dados incompatíveis com a realidade local ou, pelo menos, regional da área de estudo. Nesse estudo, dados de transporte, plastificantes, sílica ativa, aço e óleo lubrificante foram obtidos no banco de dados Ecoinvent, embora existam processos similares no Brasil com mesma tecnologia empregada. Todos os outros fluxos de entrada são de processos brasileiros que constam já no banco de dados do Ecoinvent 3.7.1. Dados produzidos localmente ou de processos similares tecnologicamente representam a realidade brasileira, o que aumenta a confiabilidade desse estudo. A identificação sobre a procedência das informações que compõe a base de dados pode ser localizada na descrição do provedor U-GLO; U-BR ou U-RoW que significa, respectivamente, fontes de informações globais (GLO), fontes brasileiras (BR) e fontes de informação não europeias (RoW: resto do mundo). Os cálculos realizados para alterar os parâmetros, para cada estudo, estão descritos na seção de “Resultados e discussão”.

8.3 Resultados e discussão

8.3.1 Análise de sensibilidade para a produção de concreto

A escolha dos parâmetros selecionados para modificação fundamentou-se no resultado obtido que os indicou como aqueles de maior influência no potencial impacto para as categorias analisadas (Cenário 1): substituição da sílica ativa por CBC, diminuição do teor de cimento no traço do concreto e alteração da distância percorrida no transporte dos insumos até a indústria. Além desses, analisou-se, o reaproveitamento dos efluentes líquidos para uso interno, como lavagem de equipamentos, uma vez que uma das indústrias possui capacidade para a sua captação.

Em relação à reutilização dos resíduos de concreto no processo produtivo, não foi realizada a análise, pois a lei brasileira não permite a utilização desse tipo de resíduos para esse fim (confeção de concreto armado) (BRASIL, 2002). Nesse caso, ainda pode haver o reaproveitamento para outras finalidades, como fabricação de artefatos de concreto e pavimentação de estradas, por exemplo. Algumas destas vias de aproveitamento podem vir a ser simuladas, posteriormente, quando existir informações de qualidade que permitam fazê-lo.

A escolha da CBC em substituição à sílica ativa se deu por haver a facilidade de acesso a esse insumo, uma vez que há uma usina de cana-de-açúcar na cidade União-PI, vizinha à cidade de Teresina (64 km) (NOVA CANA, 2020), onde as concreteiras estudadas estão instaladas. Além disso, é um material que pode ser considerado mais sustentável do ponto de vista ambiental, uma vez que há reaproveitamento de um resíduo gerado pelas indústrias produtoras de açúcar e etanol (MACIEL *et al.*, 2020).

O bagaço gerado durante a extração do caldo na moagem da cana-de-açúcar constitui-se o maior resíduo da agricultura brasileira (CABRAL; AZEVEDO, 2016). Segundo Sales e Lima (2010), para cada tonelada de bagaço incinerado, são gerados, aproximadamente, 25 kg de cinzas. Esse resíduo pode ter um destino ambientalmente adequado transformando-se em um insumo para a fabricação de argamassa e concreto para uso na construção civil. Segundo Ahmed *et al.* (2019), as cinzas volantes, ou seja, resíduos siliciosos baseados na agricultura, como a CBC, são considerados os mais sustentáveis para a fabricação de concreto.

A sílica ativa, utilizada nas indústrias estudadas, é um subproduto da produção do silício elementar ou de ligas contendo silício (SILVA; BORTOLETTO; ALMEIDA, 2017). Assim, para a obtenção desse insumo é necessária a exploração mineral (quartzo), que pode ser evitada com o uso de materiais como a CBC, uma vez que ambos são materiais cimentícios, que tem a mesma finalidade de utilização na composição do concreto. O recurso mineral, uma vez que é retirado da natureza, não pode ser repostado de nenhuma forma, portanto, quando possível, em termos de sustentabilidade, deve-se escolher subprodutos provenientes de recursos agrícolas que podem ser replantados, muitas vezes, por vários anos.

Lima *et al.* (2011) e Castellani, Guimarães e Fazzan (2016) incentivam a valorização da CBC como material pozolânico para concretos em virtude do potencial ganho nas propriedades mecânicas e de durabilidade, quando comparado às misturas sem adição de cinza. Alves e Martins Filho (2017) complementam afirmando que os traços confeccionados com utilização de CBC apresentam propriedades similares ou superiores ao traço de referência, mostrando-se eficiente para diversas aplicações no campo da construção civil.

O cálculo da quantidade de CBC utilizado em substituição à sílica ativa foi feito baseado no estudo de Gorges, Wedekind e Sousa (2019) que admitem que para cada kg de cimento, usa-se 0,250 kg de CBC. Os autores afirmam que o teor adotado para a substituição de cimento foi de 20% de CBC, pois essa proporção apresenta resultados satisfatórios em análises de dosagem de concreto e argamassas. Para Oliveira *et al.* (2017), a CBC apresenta um alto teor de sílica podendo ser usada para substituir parte do cimento em argamassas e concretos, em massa, em torno de até 30%. No entanto, optou-se por utilizar o teor de 20%, pois segundo o estudo de

Gorges, Wedekind e Sousa (2019), em parcelas maiores que 30% as análises demonstraram menor resistência, maior porosidade e, também, maior absorção de água.

O cálculo das distâncias percorridas pela matéria-prima foi feito tendo em vista o fornecedor de insumos mais próximo das indústrias analisadas. Em relação aos aditivos (1.200 km) há um distribuidor localizado à 600 km de Teresina, configurando uma redução de 600 km no percurso até as indústrias. O fornecedor de cimento fica a 1.150 km. Há uma fábrica de cimento a 400 km, o que reduziria em 750 km a distância com o deslocamento desse insumo. Os demais materiais utilizados já são adquiridos dos fornecedores mais próximos. As razões estratégicas atuais para a obtenção de matéria prima mais distante, tendo disponível o mesmo tipo e qualidade de material mais próximo, possivelmente envolve custo e acordos entre empresas, contudo isto não foi revelado aos pesquisadores.

Admitiu-se a hipótese de reaproveitar todo o efluente captado, para uso interno na empresa. Em uma das empresas, existem canaletas no chão em que é feita a captação da água desperdiçada no processo produtivo e na lavagem de máquinas e equipamentos, conduzindo-a a um tanque onde é feito um processo simples de decantação para reaproveitamento do efluente. O estudo de Odppes, Michalovicz e Bilotta (2018) demonstrou que a adoção desse procedimento para reutilização de água, em indústrias de fabricação de concreto, pode levar a uma economia de até 61% da demanda mensal de água, nesses empreendimentos.

A utilização de água de reuso na produção do concreto pode alterar suas propriedades (ASADOLLAHFARD *et al.*, 2015), no entanto, o seu uso em lavagem de caminhões, máquinas e no pátio da empresa pode ser uma alternativa para o desperdício da água. Como os dados foram contabilizados de forma agregada, adotou-se como entrada do sistema a quantidade total de efluente líquido gerado. Assim, com a alteração dos parâmetros, obteve-se a redução dos potenciais impactos ambientais para todas as categorias do método CML, com valores significativos, conforme indicado na Tabela 3 e nos gráficos da Figura 1. Segundo a norma ABNT ISO 14044 (2014a), as mudanças significativas nos resultados são aquelas em que a diferença entre os valores é maior do que 10% (para mais ou para menos).

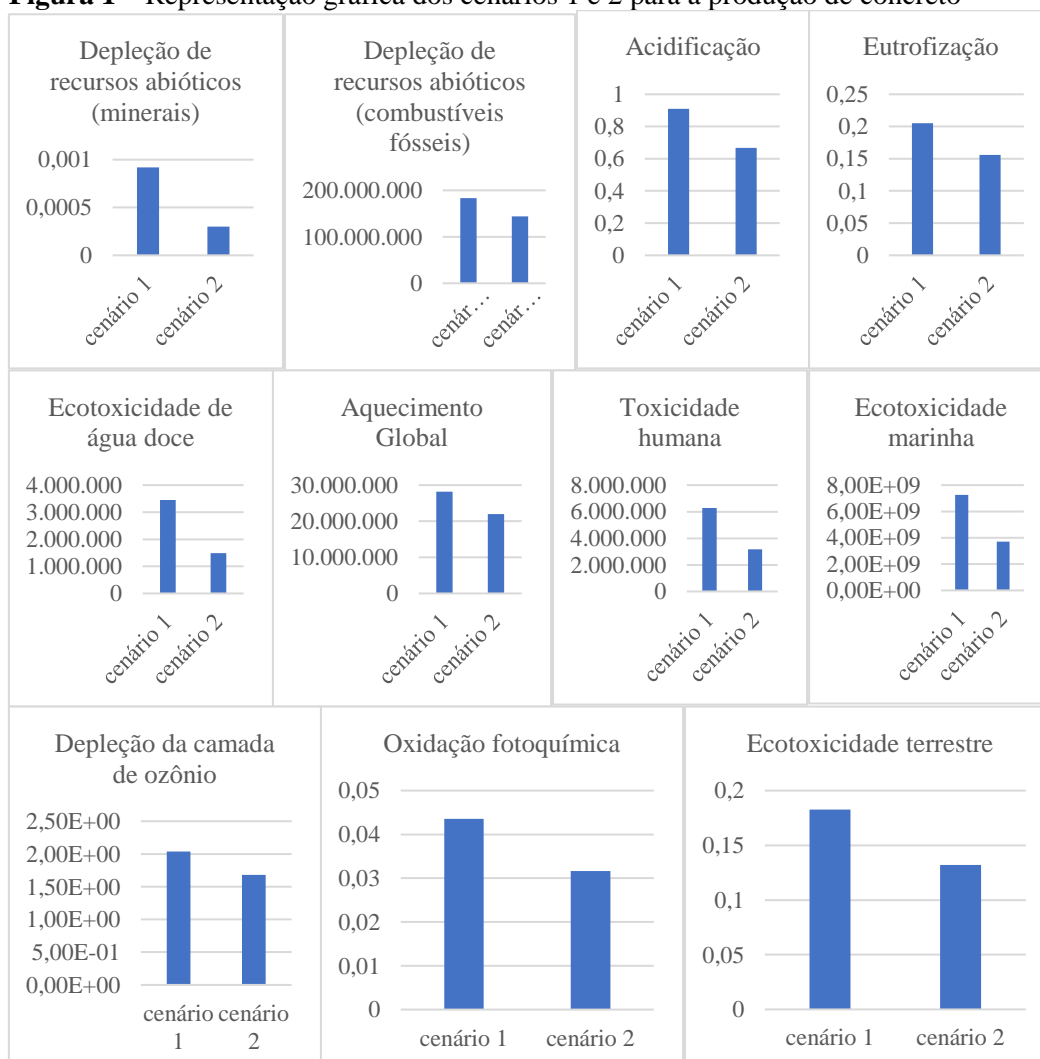
Para a categoria depleção de recursos abióticos (minerais) a redução atingiu 67,39% do valor do impacto. Isso pode ser explicado pela substituição da sílica ativa pela CBC, uma vez que se evita a exploração do recurso mineral (quartzo), uma vez que a mesma é um subproduto resultado dessa exploração, a qual um dos processos responsáveis pelo impacto nessa categoria. Berenguer *et al.* (2020) afirmam que adicionar CBC à matriz de cimento é mais um passo para dar à indústria de concreto uma oportunidade de aumentar sua responsabilidade ambiental.

Tabela 3 – Comparação entre o resultado do potencial impacto para as categorias do método CML a partir dos dados coletados e alterados para o concreto

Categorias de impacto (CML)	Resultado a partir dos dados coletados	Resultado com alteração dos parâmetros	Unidade	Redução do impacto potencial em %
Depleção de recursos abióticos (minerais)	0.00092	0.00030	kg Sb eq	-67,39
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	1834.15150	1440.08370	MJ	-21,49
Acidificação	0.90993	0.66652	kg SO ₂ eq	-26,75
Eutrofização	0.20529	0.15615	kg PO ₄ --- eq	-23,94
Ecotoxicidade de água doce	34.47684	14.85005	kg 1,4-DB eq	-56,93
Aquecimento Global	281.86960	219.68553	kg CO ₂ eq	-22,06
Toxicidade humana	62.81740	31.73797	kg 1,4-DB eq	-49,48
Ecotoxicidade marinha	7.27047E+4	3.70374E+4	kg 1,4-DB eq	-49,06
Depleção da camada de ozônio	2.03613E-5	1.68323E-5	kg CFC-11 eq	-17,33
Oxidação fotoquímica	0.04353	0.03166	kg C ₂ H ₄ eq	-27,27
Ecotoxicidade terrestre	0.18253	0.13208	kg 1,4-DB eq	-27,64

Fonte: Autores

Figura 1 – Representação gráfica dos cenários 1 e 2 para a produção de concreto



Fonte: Autores

Outra categoria que se destacou com redução de 56,93% no impacto potencial foi a ecotoxicidade de água doce. Essa diminuição pode ser em decorrência da reutilização dos efluentes líquidos, evitando, assim, a contaminação das águas rasas e subterrâneas por meio do seu lançamento ou infiltração no solo.

Embora as categorias depleção da camada de ozônio e aquecimento global tenham apresentado os menores percentuais de redução, houve diminuição que pode ser explicada pela menor distância percorrida pelos insumos. Outra categoria que se enquadra nessa explicação é depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis), uma vez que, com a redução das distâncias, há menos consumo de combustíveis cujo processo de produção envolve, tanto a extração de recursos fósseis, como a emissão de gases que influenciam no efeito estufa e, conseqüentemente, no aquecimento global.

Segundo Soleimani e Shahandashti (2017), dentre os vários processos envolvidos na produção de concreto, as distâncias percorridas pelos caminhões contribuem para o impacto geral do transporte em diversas categorias. Isso pode ser atribuído, principalmente, à queima de combustível. Outros estudos têm mostrado que a distância de transporte desempenha um papel significativo nas avaliações ambientais do ciclo de vida (CHONG; HERMRECK, 2010; CHOWDHURY; APUL; FRY *et al.*, 2010; MARINKOVIC *et al.*, 2010;).

O reaproveitamento dos resíduos do concreto por outras indústrias, também, pode contribuir para a redução dos impactos ambientais, tendo em vista o potencial de utilização desse material para confecção de artefatos de concreto, pavimentação de ruas e estradas, entre outras finalidades. O reaproveitamento contribui tanto para a redução do uso de recursos naturais (por exemplo, a extração mineral de jazidas), como para a diminuição do acúmulo de resíduos no meio ambiente (COELHO; BRITO, 2013), além de proporcionar ganhos financeiros com a venda desses subprodutos. Nos arredores das indústrias de concreto pesquisadas não há empresas recicladoras para receber o material inutilizado.

Para uma indústria que priorize melhor convívio com o ambiente existe a alternativa de fazer a reciclagem e o reaproveitamento dentro da própria indústria, adquirindo uma máquina trituradora, investimento em torno de R\$ 6.500,00, possivelmente viável diante do desempenho financeiro dessas indústrias (faturamento anual em torno de em torno de R\$ 8.300.000,00). O resultado seria a obtenção de subprodutos do concreto, agregando valor ambiental à imagem da indústria.

Dessa forma, a análise demonstrou que a substituição da sílica ativa por CBC, a diminuição das distâncias percorridas pelos insumos até as indústrias, bem como, o reaproveitamento de efluentes são fatores que podem contribuir com a redução dos impactos

ambientais das indústrias que fabricam concreto. Adicionalmente, o reaproveitamento dos resíduos contribui para a redução do impacto com o acúmulo dos mesmos no ambiente. Para o impacto do aquecimento global, por exemplo, a repercussão ambiental dos efeitos dessas mudanças, em um ano de atividade industrial, seria deixar de emitir 2.234.099,60 kg CO₂ eq, considerando que o cenário proposto é exequível tecnicamente, não tem influência negativa sob a qualidade do produto e, inclusive, é favorável economicamente, uma vez que há economia em relação ao consumo de diesel e reaproveitamento de resíduos.

8.3.2 Análise de sensibilidade para a produção de postes de concreto armado

Para o estudo do poste foram alterados os seguintes parâmetros: diminuição das distâncias dos insumos até a indústria e do transporte interno, utilização dos resíduos em substituição parcial aos agregados naturais, reutilização dos efluentes e utilização de CBC a fim de diminuir o teor de cimento no traço do concreto.

Em relação às distâncias percorridas, o cimento é o único insumo que não é adquirido na indústria mais próximas de Teresina (1.200 km). Há uma empresa localizada a 400 km onde esse material poderia ser comprado, configurando em uma redução de 800 km. A distância entre local de produção e secagem/estocagem dos postes poderia ser substancialmente reduzida (chega a ser 700 metros em uma das indústrias visitadas). Considerando o transporte interno da produção mensal, cerca de aproximadamente 300 viagens, carregando 6 postes por vez, é possível reduzir à metade (aproximadamente 100 km) esse transporte interno.

Os efluentes gerados no processo podem ser captados e reaproveitados adotando a mesma técnica utilizada nas indústrias de concreto: uso de canaletas na área de cura que possam conduzir os efluentes para um tanque onde possa ser feito o simples processo de decantação para reutilização da água em usos internos como lavagem de equipamentos, frota e limpeza do pátio da indústria. O estudo de Odppes, Michalovicz e Bilotta (2018) demonstrou que o investimento médio necessário para a implantação de um sistema de reuso, como o utilizado nas concreteiras (tendo em vista o porte similar entre as empresas), é de, aproximadamente, R\$ 3.244,00. Esse valor é considerado viável, tendo em vista o desempenho financeiro dessas empresas (faturamento mensal de, aproximadamente, R\$ 525.000,00).

A reutilização de resíduos em concretos enfrenta alguns desafios que compreendem basicamente três aspectos inter-relacionados que podem ser assim resumidos: aspectos (1) técnicos e de (2) segurança podem ser comprometidos pela (3) composição variável dos resíduos. A reutilização proposta como alternativa foi feita com base no estudo de Domenico

et al. (2018), que confirmou a possibilidade da utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para confecção de postes, com substituição de agregados em até 25% do total utilizado no traço do concreto, quando padronizada a sua granulometria bem como seu percentual de teor na mistura.

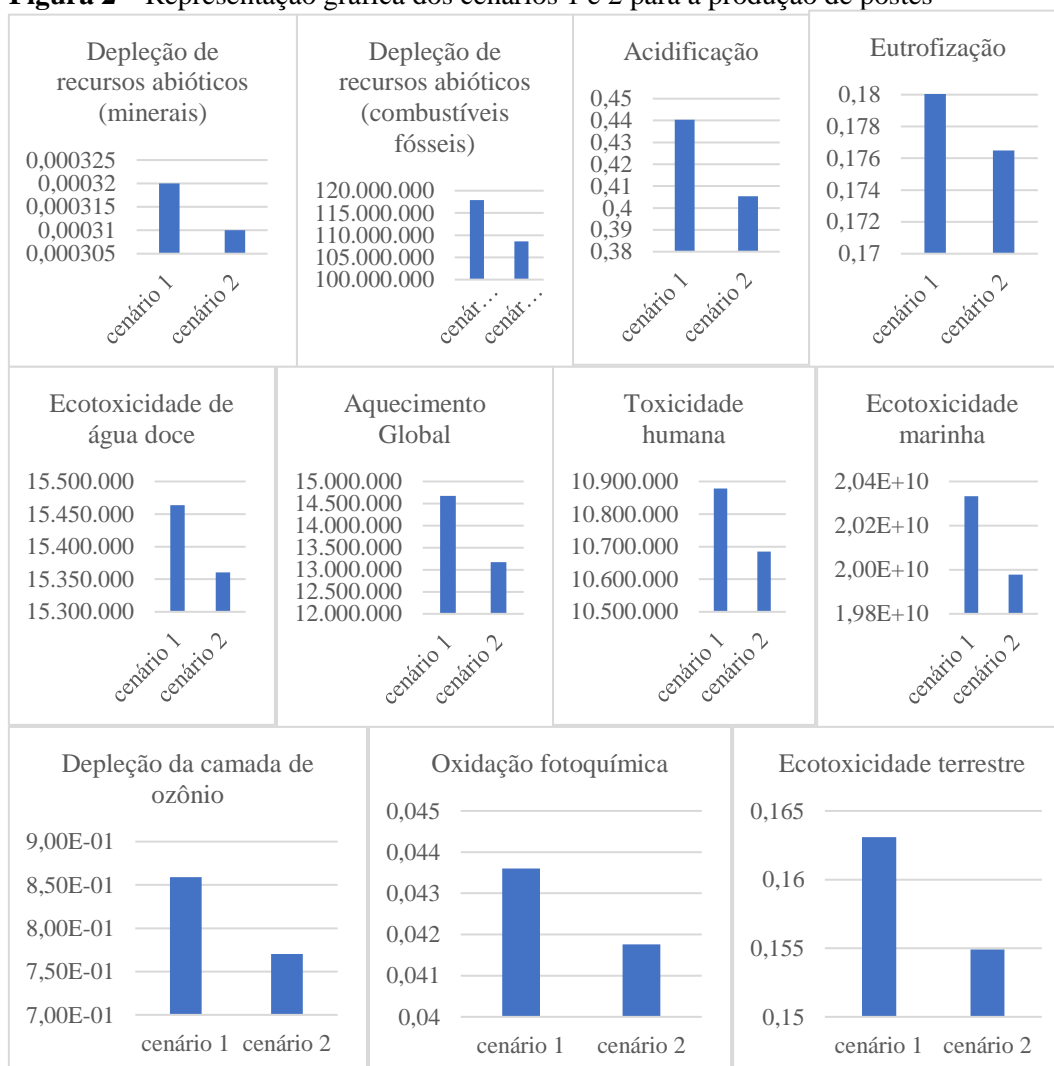
No entanto, apesar da utilização do RCD mostrar-se uma alternativa para solucionar problemas ambientais e econômicos da indústria da construção civil, para se fazer melhor uso dessa tecnologia, é importante que as características de agregados oriundos de RCD sejam constantemente estudadas, uma vez que ainda não há uma norma específica que padronize a utilização de agregados reciclados na produção de concreto estrutural (DOMENICO *et al.*, 2018). A adição de CBC, a fim de diminuir o teor de cimento na mistura, foi feita utilizando os mesmos parâmetros do estudo do concreto, com base em Gorges, Wedekind e Sousa (2019) que admitem que para cada kg de cimento, usa-se 0,250 kg de CBC, com a redução máxima de 20%, em massa, do total de cimento no traço do concreto.

Assim, adotando-se a substituição dos agregados (brita e areia) em 25% de massa, diminuição das distâncias percorridas em 900 km, diminuição do teor de cimento em 20%, acrescido, proporcionalmente, da CBC e reaproveitamento dos efluentes captados no processo de fabricação do concreto e cura dos postes, houve alteração dos potenciais impactos, como demonstrado na Tabela 4 e nos gráficos da Figura 2.

Tabela 4 – Comparação entre o resultado do potencial impacto para as categorias do método CML a partir dos dados coletados e alterados para os postes

Categorias de impacto (CML)	Resultado a partir dos dados coletados	Resultado com alteração dos parâmetros	Unidade	Redução do impacto potencial em %
Depleção de recursos abióticos (minerais)	0.00032	0.00031	kg Sb eq	-3,13
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	1178.73109	1086.11934	MJ	-7,86
Acidificação	0.44032	0.40538	kg SO ₂ eq	-7,94
Eutrofização	0.18634	0.17650	kg PO ₄ --- eq	-5,28
Ecotoxicidade de água doce	154.63624	153.60567	kg 1,4-DB eq	-0,67
Aquecimento Global	146.75089	131.69626	kg CO ₂ eq	-10,26
Toxicidade humana	108.78082	106.84515	kg 1,4-DB eq	-1,78
Ecotoxicidade marinha	2.03338E+5	1.99782E+5	kg 1,4-DB eq	-1,75
Depleção da camada de ozônio	8.58940E-6	7.70174E-6	kg CFC-11 eq	-10,33
Oxidação fotoquímica	0.04360	0.04176	kg C ₂ H ₄ eq	-4,22
Ecotoxicidade terrestre	0.16308	0.15491	kg 1,4-DB eq	-5,01

Fonte: Autores

Figura 2 – Representação gráfica dos cenários 1 e 2 para a produção de postes

Fonte: Autores

Embora todos os parâmetros alterados tenham sido fortemente apoiados na literatura científica e no conhecimento do processo produtivo local, cada realidade implica condições ótimas diferentes para melhorar o desempenho ambiental, sem inviabilizar outros parâmetros técnicos e econômicos. Contudo, a técnica de estudo aqui implementada é de fácil acesso e aplicação, tendo as informações adequadas da indústria interessada. Não houve mudança significativa nos resultados (diferença entre os valores maior do que 10%) para a maioria das categorias de impacto. Apenas nas categorias aquecimento global e depleção da camada de ozônio os resultados apresentaram valores um pouco acima de 10%. Para as demais categorias, a diferença não foi relevante em relação à verificação da sensibilidade, embora tenha ocorrido diminuição nos valores em todas elas.

Do ponto de vista estatístico e do que preconiza a norma técnica de aplicação de ACV, as modificações propostas neste trabalho ainda não foram suficientes para efetiva melhoria nas

diversas categorias de impactos ambientais, contudo apontaram solidamente uma direção em busca de alternativas mais amigáveis ao meio ambiente. Essa é a razão pela qual teceremos breves comentários sobre as implicações ambientais dessas mudanças baseado nas categorias de impactos estudadas.

As categorias que apresentaram a maior redução foram depleção da camada de ozônio e aquecimento global, que pode ser atribuída à diminuição das distâncias percorridas pelos caminhões (entrega dos insumos e deslocamento dos produtos dentro da empresa), culminado na menor emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, o que, também, contribui para a redução do impacto relativo outras categorias, como toxicidade humana, ecotoxicidade (terrestre e aquática), acidificação e eutrofização. A queima de combustíveis e a consequente produção de gás carbônico no processo está bem mais relacionada com o efeito estufa, contudo, a procedência do diesel e as características do processo de combustão nos veículos, produzem outros gases, além do gás carbônico, que podem contribuir para a complexa reação fotoquímica responsável pela depleção da camada de ozônio.

As distâncias percorridas por materiais costumam contribuir para o impacto em diversas categorias, em avaliações do ciclo de vida (CHOWDHURY; APUL; FRY, 2010; SOLEIMANI; SHAHANDASHTI, 2017), e a diminuição das mesmas promove benefícios em termos ambientais. Os postes de concreto são materiais pesados (900 kg) o que leva a um maior consumo de combustível e energia para seu deslocamento. Assim, a redução da distância percorrida no interior da empresa, contribui para a redução do impacto com o transporte. A redução de deslocamentos é também uma meta perseguida pelas empresas quando afeta os seus custos diretos.

As categorias depleção de recursos minerais e fósseis sofreram redução, possivelmente, pela utilização de resíduos em substituição aos agregados (brita e areia), o que leva a diminuição da extração de jazidas naturais. Essas categorias, também, têm seu potencial impacto reduzido pela diminuição das distâncias e exploração fóssil para a geração de energia e produção de combustíveis.

Os recursos naturais necessários para a produção de concreto podem ser renováveis, como água, e não renováveis, como minerais e combustíveis fósseis. A depleção abiótica refere-se à exaustão de recursos não renováveis e aos impactos ambientais decorrentes (KIM; TAE, 2016). Esse fato confirma que o reaproveitamento dos resíduos contribui para a redução dos potenciais impactos ambientais causados pela exploração e utilização de recursos naturais (minerais e fósseis), mesmo que, para esse estudo, os valores tenham sido pouco significativos.

O potencial impacto das categorias acidificação, eutrofização e ecotoxicidade (de água doce, marinha e terrestre), normalmente, depende do local ou região no qual ocorrem (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). As fontes que geram o potencial impacto para essas categorias, nesse estudo, são as emissões provenientes, principalmente, dos processos de tratamento e disposição de resíduos, confirmando a importância do seu reaproveitamento no processo produtivo de postes, muito embora essas categorias não tenham apresentado redução significativa no potencial impacto. O aprimoramento na gestão dos resíduos pode aumentar a significância em relação à redução dos impactos nessas categorias.

Para a categoria aquecimento global, os processos que mais contribuem para o potencial impacto são a produção de cimento (clinker) e de aço. No caso dessas indústrias, a diminuição do teor de cimento, com o uso de CBC se mostrou eficaz. Segundo Lu e El Hanandeh (2017) o transporte, o consumo de combustível fóssil, bem como uso de materiais que demandam intenso consumo de energia durante o processo de fabricação dos postes são os maiores contribuintes para a categoria aquecimento global. Os autores, também, afirmam que essa categoria é mais sensível a mudanças em análises de sensibilidade, o que pode ter provocado a redução do potencial impacto ambiental.

Um dos parâmetros que permaneceu inalterado, nessa análise foi a armação de aço, que reforça os postes. Renzulli *et al.* (2016) desenvolveram um estudo de ACV da produção de aço, no qual concluíram que os maiores impactos estão nas atividades realizadas na fase de operação de alto forno. Esse fato indica que a possibilidade de diminuir a quantidade de aço utilizada em postes de concreto armado pode resultar em melhorias do ponto de vista ambiental, especialmente, relativo às emissões atmosféricas que contribuem para o impacto do aquecimento global. Uma das formas de reduzir as emissões de CO₂ da indústria siderúrgica é utilizando aços de alta resistência em substituição aos comuns que geram 5,7% menos emissões atmosféricas (LI; LEI; PAN, 2016). Essa possibilidade precisa ser verificada, para essas indústrias, sob outros enfoques (econômico), por exemplo, para que alcance os efeitos desejados. Além disso, existem as normas técnicas do setor que devem ser atendidas.

Assim, a análise indicou que a diminuição das distâncias percorridas pelos caminhões, a reutilização de resíduos e efluentes e a substituição parcial do cimento por CBC podem contribuir com a diminuição dos potenciais impactos ambientais causados por indústrias que fabricam postes de concreto armado, embora com pouca representatividade. No entanto, ainda que a redução tenha sido menos representativa do que os resultados do estudo do concreto, tomando como exemplo o impacto do aquecimento global, a repercussão ambiental dos efeitos dessas mudanças, em um ano de atividade industrial, seria deixar de emitir 315.000 kg CO₂ eq,

considerando, também, a exequibilidade técnica do cenário proposto, não há influência negativa na qualidade do produto e é favorável economicamente, em relação à economia com o menor consumo de diesel e reaproveitamento de resíduos.

8.4 Conclusões

A sociedade moderna depende do concreto e de seus derivados (como os postes) para viver com mais conforto e segurança. No entanto, a produção desses materiais causa diversos impactos ambientais negativos que podem ser mensurados por ferramentas como a ACV. Em um estudo de ACV é possível conduzir análises de sensibilidade, variando parâmetros, a fim de encontrar o melhor cenário, que aponte os meios de mitigar os potenciais impactos levantados na pesquisa, aprimorando o processo produtivo com o uso de insumos mais sustentáveis.

A análise de sensibilidade da produção de concreto demonstrou que o uso do CBC em substituição à sílica ativa, diminuição do teor de cimento no traço do concreto, diminuição das distâncias percorridas pelos insumos até a indústria e reuso de efluentes contribui, eficazmente, para a redução dos impactos ambientais provocados por essas indústrias em todas as categorias do método CML, com maior intensidade para depleção de recursos abióticos (minerais) e ecotoxicidade de água doce.

Para as indústrias que fabricam postes, as reduções significativas dos potenciais impactos ocorreram nas categorias depleção da camada de ozônio e aquecimento global. Ficou comprovado que o reaproveitamento de resíduos, a redução das distâncias percorridas pelos insumos e pelo deslocamento do material, o reaproveitamento de efluentes e a substituição parcial do cimento por CBC contribuem pouco para a redução do impacto geral, nessas indústrias.

A impossibilidade de utilizar resíduos na composição do concreto estrutural não impede que as concreteiras deem um destino adequado para os mesmos, que podem ser usados na fabricação de artefatos como blocos, peças, vasos, bancos, entre outros, para serem vendidos como subprodutos. Assim, deve-se constantemente buscar alternativas que possam conduzir as atividades das indústrias da construção civil que produzem concreto e postes a um patamar de sustentabilidade ambiental, social e econômica, onde as alternativas mais viáveis sejam adotadas, tendo em vista a viabilidade de variação desses e de outros parâmetros.

O principal legado do presente trabalho foi apresentar uma metodologia consistente de avaliação antecipada de modificações no processo produtivo, simulando alterações nos parâmetros atuais usados em produção, que permite buscar a excelência ambiental dentro de

paramentos econômicos aceitáveis. A repercussão ambiental demonstrada nos resultados aponta ganhos significativos quando se considera um ano de atividade industrial (como a quantidade de CO₂ que deixa de ser emitida para a atmosfera, por exemplo). É importante mencionar que a viabilidade de utilizar o cenário que proporciona ganhos ambientais consiste no fato de que o cenário proposto é exequível tecnicamente, o produto não tem sua qualidade comprometida e, ainda, é favorável economicamente, pela economia com combustível (decorrente da diminuição das distâncias) e reaproveitamento dos resíduos sólidos e efluentes líquidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEPI ((Edital FAPEPI / MCT/ CNPq N° 007/2018 - Programa de Infra-Estrutura para Jovens Pesquisadores / Programa Primeiros Projetos - PPP) e ao CNPq pelo financiamento dos projetos de pesquisa [401320/2016-2] e [422087/2018-1] e o pesquisador JMMN agradece ao CNPq pelo financiamento através da Bolsa de Produtividade em Pesquisa [304974/2018-8].

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040:2014. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR ISO 14044:2014 **Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014a.

ACERO, A.P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. **LCA methods**. Green Delta. Version 1.5.5. 2016. Disponível em <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/11/LCIA-METHODS-v.1.5.5.pdf>. Acesso em 25 mar 2020.

AHMED, M.; QURESHI, M. N.; MALLICK, J.; KAHLA, N. B. Selection of Sustainable Supplementary Concrete Materials Using OSM-AHP-TOPSIS Approach. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, p. 1-12, 2019.

Allacker, K.; Mathieux, F. ; Manfredi, S. ; Pelletier, N. ; De Camillis, C. ; Ardente, F. ; Pant, R. Allocation solutions for secondary material production and end of liferecovery: Proposals for product policy initiatives. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 88, p. 1–12, 2014

ASADOLLAHFARDI, G.; ASADI, M., JAFARI, H.; MORADI, A.; ASADOLLAHFARDI, R. Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 305-314, 2015.

BERENGUER, R.; LIMA, N.; VALDE´S, A. C.; MEDEIROS, M. H. F.; LIMA, N. B. D.; DELGADO, J. M. P. Q.; SILVA, F. A. N.; AZEVEDO, A. C.; GUIMARˆES, A. S.; RANGEL, B. Durability of Concrete Structures with Sugar Cane Bagasse Ash. **Advances in Materials Science and Engineer**, v. 2020, p. 1-16, 2020.

BORGES, P. H. R.; LOURENO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da anˆlise de ciclo de vida de concretos geopolimˆricos e de concretos ˆ base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014.

BRAGAGNOLO, L.; KORF, E. P. Aplicaˆo de resı́duos na fabricaˆo de concreto: como tˆcnicas analı́ticas de caracterizaˆo podem auxiliar na escolha preliminar do material mais adequado? **Revista Matˆria**, v.25, n.1, p. 1-15, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resoluˆo 307**, de 05 de julho de 2002. Disponı́vel em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em 01 mar 2020.

CABRAL, S. C.; AZEVEDO, M. A. Materiais alternativos para adiˆo ao cimento Portland. **Revista Vozes dos Vales**, n. 10, p. 1-16, 2016.

CASTELLANI, G. A.; GUIMARˆES, P. V. C.; FAZZAN, J. V. Valorizaˆo da Cinza do Bagao da Cana-de-Aucar para a produˆo de misturas cimentı́cias. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 5, p. 109-123, 2016.

CHONG, W. K.; HERMRECK, C. Understanding transportation energy and technical metabolism of construction waste recycling, **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 9, p. 579-590, 2010.

CHOWDHURY, R.; APUL, D.; FRY, T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction, **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 4, p. 250-255, 2010.

COELHO, A.; BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 338-352, 2013.

DOMENICO, P. D.; LIMA, T. T.; CASTRO, R. M.; CASTRO, M. N. Influˆncia do agregado miúdo reciclado na resistˆncia ˆ compressˆo e porosidade do concreto. **Revista Internacional de Ciˆncias**, v. 8, n. 1, p. 129 - 147, 2018.

GORGES, G. C.; WEDEKIND, J. P.; SOUSA, T. B. Substituiˆo parcial do cimento Portland por cinza do bagao da cana-de-aucar em argamassa. **Congresso Tˆcnico Cientı́fico da Engenharia e da Agronomia CONTECC**, p. 1-5, 2019.

IBRACON. Instituto Brasileiro do Concreto. **Publicaˆes**. Disponı́vel em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf. Acesso em 15 jan 2021.

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

KIM, T. H.; TAE, S. H. Proposal of Environmental Impact Assessment Method for Concrete in South Korea: An Application in LCA (Life Cycle Assessment). **International Journal of Environmental Research and Public Health** v. 13, p. 1-16, 2016.

LI, L.; LEI, Y.; PAN, D. Study of CO₂ emissions in China's iron and steel industry based on economic input-output life cycle assessment. **Nat Hazards**, v. 81, p. 957-970, 2016.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 201-212, 2011.

LU, H. R.; EL HANANDEH, A. Environmental and economic assessment of utility poles using life cycle approach. **Clean Techn Environ Policy**, v. 19, p. 1047-1066, 2017.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2ª Edição/Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MACIEL, D. L. O.; SILVA, J. S.; OMENA, J. C. R.; CAVALCANTE, J. R. D. Reutilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na confecção de concreto: uma revisão narrativa. **Cadernos de Graduação**, v. 6, n. 2, p. 113-122, 2020.

MARINKOVIC, S., RADONJANIN, V., MALESEV, M. AND IGNJATOVIC, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255-2264, 2010.

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.

MILANI, C. J.; BOESING, R.; PHILIPPSSEN, R. A.; MIOTTI, L. A. Processo produtivo de elementos pré-moldados de concreto armado: detecção de manifestações patológicas. **Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, v. 1, p. 82-91, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo. Bookman Editora. 2016. 887p.

NOVA CANA. Lista de Usinas de Açúcar e Etanol do Brasil por Estado. 2020. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil/estados. Acesso em 08 jan 2021.

ODPPES, R. J.; MICHALOVICZ, D. T.; BILOTTA, P. Reúso de água em indústria de fabricação de estruturas em concreto: uma estratégia de gestão ambiental. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 14, n. 34, p. 82-100, 2018.

OLIVEIRA, S. T. M.; MIRANDA, A. C.; SILVA FILHO, S. C.; KLEPA, R. B. Cinza a partir do bagaço da cana-de-açúcar reutilizada como parte integrante em argamassas e concretos na indústria civil. **XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 2-14, 2017.

OpenLCA. **Data**. 2020. Disponível em <https://www.openlca.org/lca-data/>. Acesso em 07 mar 2020.

RENZULLI, P. A.; NOTARNICOLA, B.; TASSIELLI, G.; ARCESE, G.; DI CAPUA, R. Life Cycle Assessment of Steel Produced in an Italian Integrated Steel Mill. **Sustainability**, v. 8, p. 2-15, 2016.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**. V. 30, n. 6, p. 1114-1122, 2010.

SILVA, R. G.; BORTOLETTO, M.; ALMEIDA, J. G. Sílica ativa e cinza do bagaço de cana de açúcar: resíduos que podem suplementar ou substituir o cimento Portland. **ANAP Brasil**, v. 10, n. 21, p. 1-12, 2017.

SOLEIMANI, M.; SHAHANDASHTI, M. Comparative process-based life-cycle assessment of bioconcrete and conventional concrete, **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 15, n. 5, p. 667-688, 2017

SOUZA, H. H. S. Avaliação do ciclo de vida e influência do tempo de vida útil dos postes de madeira e concreto do sistema de distribuição de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 159, 2014.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dessa pesquisa possibilitaram conhecer a importância do setor minerário para a contribuição com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), as leis que regem esse ramo industrial e os principais impactos ambientais gerados por indústrias da construção civil que utilizam a brita como insumo, a saber, as concreteiras e as empresas que fabricam postes.

As indústrias de mineração, bem como as que fabricam concreto e postes, têm a possibilidade de contribuir para o alcance das metas associadas aos ODS, como: inovação e infraestrutura (ODS 9), cidade e comunidades sustentáveis (ODS 11), consumo e produção sustentáveis (ODS 12), inclusão feminina atingindo o ODS relativo à igualdade de gênero (ODS 5), entre outros. Além desses, as indústrias de postes ainda contribuem com o ODS 7, relativo ao acesso à energia. O atendimento aos ODS vai ao encontro do cumprimento da agenda 2030, promovendo o desenvolvimento sustentável em todas as suas esferas.

É fato que os ODS foram criados por uma cúpula da Organização das Nações Unidas (ONU), formada, sumariamente, por representantes de países desenvolvidos, que possuem maiores condições de atingir esses objetivos e suas respectivas metas. A realidade brasileira é diferente, principalmente, para o Nordeste e, em especial, o estado do Piauí, que possui um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,646. É o terceiro menor no ranking nacional, superior apenas ao do Maranhão (0,639) e Alagoas (0,631) (IBGE, 2010). Essa situação se configura como um entrave na aplicação dos ODS, uma vez que é preciso resolver problemas muito mais urgentes como a fome, a pobreza, o acesso à água e o saneamento básico.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) proporciona subsídios para o atingimento dos ODS, uma vez que revela os potenciais impactos ambientais causados pelas indústrias e em quais processos é necessária maior atenção, a fim de evitar/mitigar esses impactos. Por meio da ACV, é possível mensurar os impactos ambientais gerados pela fabricação e utilização de concreto e postes com o objetivo de disseminar e fomentar a aplicação de boas práticas, melhorando a Gestão do Ciclo de Vida (GCV) em toda a cadeia associada ao produto/serviço dessas indústrias.

Dentre os diversos desafios da GCV pode-se citar a dificuldade em adotar o pensamento de ciclo de vida na tomada de decisão das empresas. É preciso avançar no sentido de orientar as metas dessas indústrias aos ODS, considerando o ciclo de vida desses produtos. Uma vez que as empresas passam a conhecer seus impactos de forma mais ampla, elas tornam-se mais responsáveis pelo que acontece antes, durante e depois da sua operação.

As leis que regulamentam o setor minerário, bem como outros setores industriais, como o da construção civil, oportunizam a busca pela sustentabilidade. Por meio dos subsídios fornecidos pela ACV e o conhecimento das leis que regem o setor, é possível incentivar o pensamento do ciclo de vida dentro das organizações e na sociedade como um todo. Por exemplo, existem leis que regulamentam o uso de Resíduos da Construção Civil (RCDs) que precisam ser observadas a fim de otimizar sua utilização, dentro dos preceitos legais. Assim, há oportunidade de adaptação a um conceito de economia circular, com a disseminação do pensamento do ciclo de vida por meio de políticas públicas e leis que promovam a GCV nas indústrias.

A partir da aplicação da ACV nas indústrias de fabricação de concreto foi constatado que os principais impactos estão relacionados ao processo de produção do cimento, da sílica ativa, que acontecem fora das indústrias investigadas (o que reforça a importância de gerir toda a cadeia associada ao produto/serviço) e da geração/deposição de resíduos. Nas indústrias de postes, as categorias que se sobressaíram foram aquelas associadas à ecotoxicidade e toxicidade humana, havendo contribuição sumária da geração de resíduos para os seus potenciais impactos.

Foi possível analisar a incerteza para ambos os estudos (concreto e postes), constatando que há uma tendência à ocorrência para indicadores de ecotoxicidade em ACVs de materiais de construção. Foram conduzidas análises de sensibilidade para os dois produtos e avaliados diferentes cenários, com a variação de parâmetros com o objetivo de encontrar o cenário ideal, onde possa haver redução de impactos ambientais e ganhos econômicos e sociais.

Foi constatado que a variação desses parâmetros resultou em diminuição dos potenciais impactos para ambos (concreto e postes), no segundo cenários, no qual foram alterados os parâmetros. Isso pode ser explicado pela substituição da sílica ativa por CBC, pela redução das distâncias o que leva à redução da exploração mineral em diversos processos do ciclo de vida do concreto e do poste. Além disso, o potencial impacto reduzido para as categorias depleção de recursos abióticos (minerais e fósseis), no estudo dos postes, pode ser resultado do reaproveitamento de resíduos, que diminui o uso de brita e areia, contribuindo para a redução da extração das jazidas minerais naturais.

Dessa forma, pode-se propor o reaproveitamento dos resíduos dentro das próprias indústrias: no caso do concreto, para confecção de artefatos para venda como subproduto, uma vez que não é possível o seu uso na produção de concreto estrutural. Outra forma de reaproveitamento desse material é por meio do envio para usinas pavimentadoras, que podem aproveitá-los na pavimentação de estradas e ruas.

No caso dos postes, os resíduos de concreto podem ser usados na própria composição dos mesmos, o que deve ser incentivado como forma de contribuição ambiental, diminuindo a quantidade acumulada no ambiente, e econômica, pelo aproveitamento de um produto que seria descartado. Como esse é um resíduo primário, parece lógico que a própria indústria faça o reaproveitamento para o mesmo produto, no entanto, uma das razões para a dificuldade de implementação dessa ação pode estar associada o custo de reprocessamento antes do reaproveitamento. Essas indústrias ficam localizadas próximas a uma usina de asfalto, o que facilita a troca e utilização desses resíduos em pavimentações.

Nas indústrias pesquisadas foi observado algumas iniciativas tímidas em relação à economia circular. Há algum aproveitamento de resíduos: o resíduo do concreto é parcialmente utilizado para confecção de cercas e uma parte é destinada para aterramento. Na indústria de postes há o envio de resíduos de vergalhões de aço para empresas de “ferro velho” e parte dos postes são triturados e os resíduos utilizados para pavimentação.

Mas ainda há muito a avançar nesse sentido. Muitos resíduos ficam acumulados no pátio das indústrias, sem destinação adequada, causando contaminação de solo, água e ar. É certo que, no Brasil, os resíduos de concreto gerados por essas indústrias, não podem ser utilizados para fabricação de concreto estrutural. Mas nada impede que, em um futuro próximo, tecnologias venham a ser desenvolvidas para a reutilização desses materiais de forma segura, por indústrias brasileiras. Dessa forma, além da diminuição dos impactos relativos à extração de recursos naturais, haveria a contribuição para a economia circular, de forma prática, por meio da simbiose industrial.

A troca de materiais entre indústrias favorece a prática da economia circular. Os resíduos de uma indústria podem servir de matéria-prima para outras, mesmo que em diferentes cadeias produtivas. E a simbiose industrial é o meio para isso. Nos arredores das indústrias de concreto pesquisadas não há empresas recicladoras que possam receber o material inutilizado, o que torna a distância um empecilho para essa prática. Em relação à uma das indústrias de postes, há uma usina de asfalto próxima (aproximadamente 800 metros) que pode receber os resíduos para utilização em pavimentações.

Assim, a troca de materiais entre empreendimentos, por meio da simbiose industrial e, com base em GCV, é um meio de conduzir as indústrias analisadas a um modelo circular de economia, onde o reaproveitamento e reciclagem de resíduos possam promover sustentabilidade ambiental e econômica, nesse setor. Ademais, há contribuição social à medida que muitos impactos negativos na saúde e qualidade de vida da população estão associados aos resíduos acumulados, gerados por indústrias da construção civil.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207:1982. **Terminologia e classificação de pavimentação: terminologia**. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR 7211:2005. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2005

_____. NBR 7212:2012. **Execução do concreto dosado em central - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR ISO 14040: **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR ISO 14044: **Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. ISO/TR 14047: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR ISO 14046: **Gestão ambiental — Pegada hídrica — Princípios, requisitos e diretrizes**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. ISO/TS 14071: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. ISO/TS 14017: **Rótulos e declarações ambientais — Desenvolvimento de regras de categoria de produto**. Rio de Janeiro, 2019.

ACERO, A.P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. **LCA methods**. Green Delta. Version 1.5.5. 2016. Disponível em <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/11/LCIA-METHODS-v.1.5.5.pdf>. Acesso em 25 mar 2020.

ACV-IBICT. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2020. Disponível em: <https://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv/>. Acesso em 25 ago 2020.

ADAMS, A.; SCHENKER, U.; LOERINCIK, Y. Life Cycle Management as a way to operationalize the creating shared value concept in the food and beverage industry: A Case Study. In: SONNEMANN, G.; MARGINI, M., Ed(s). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Springer, 2015. p. 341-348.

ADAMS, K. T.; OSMANI, M.; THORPE, T.; THORNBACK, J. Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers. **Waste and Resource Management**. v. 170, p. 15-24, 2017.

ANEPAC - Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil. 2018. Disponível em <<http://www.anepac.org.br/>>. Acesso em 11 mai 2018.

AZCARATE-AGUERRE, J. F.; DEN HEIJER, A. C.; KLEIN, T. Integrated Facades as a Product-Service System: Business process innovation to accelerate integral product implementation. **Journal of Facade Design and Engineering**, v. 6, n. 1, pp.41-56, 2017.

BELLANTUONO, N.; CARBONARA, N.; PONTRANDOLFO, P. The organization of eco-industrial parks and their sustainable practices. **Journal of Cleaner Production**. v.161, pp. 362-375, 2017.

BRAGANÇA, L.; VIEIRA, S. M.; ANDRADE, J. B. Early stage design decisions: the way to achieve sustainable buildings at lower costs. **The Scientific World Journal**, v.14, pp. 1-8, 2014.

BRASIL. **Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017**. Cria a Agência Nacional de Mineração (ANM); extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM); altera as Leis nºs 11.046, de 27 de dezembro de 2004, e 10.826, de 22 de dezembro de 2003; e revoga a Lei nº8.876, de 2 de maio de 1994, e dispositivos do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2017/lei/L13575.htm. Acesso em 10 mai 2018

BS 8001:2017. A guide. **Executive briefing**: The world's first standard for implementing the principles of the circular economy in organizations. Disponível em: <https://www.bsigroup.com/Sustainability/BS8001_Executive_Briefing.pdf>. Acesso em: 15 mai 2018.

BS EN 15978:2011. **Sustainability of construction works** — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. European Committee for Standardization. 64 p. 2011.

BS EN 15804:2019. **Sustainability of construction works** — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardization. 72 p. 2019.

CABEZAS, J.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, T.; GÓMEZ-GALÁN, J. A.; CIFUENTES, H.; CARVAJA, R. G. Compact Embedded Wireless Sensor-Based Monitoring of Concrete Curing. **Sensors**, v. 18, n. 876, p. 2-17, 2018.

CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para blocos de concreto e diferentes argamassas. **Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 2, n. 2, p. 34-61, 2018.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. In: **Banco de dados**: número de estabelecimentos na construção civil. Brasília, 2020. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/empresas-de-construcao/estabelecimentos-na-construcao>>. Acesso em 20 abr 2020.

CE100 BRASIL. **Uma economia circular no Brasil**: uma abordagem exploratória inicial. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em:

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf> Acesso em 29 abr 2018.

CERQUEIRA, D. P.; PORTELLA, K. F.; PORTELLA, G. D. O. G.; CABUSSÚ, M.; MACHADO, E. C.; DA SILVA, G. C.; BRAMBILLA, K. J. C.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, D. R.; SALLES, R. N.; PEREIRA, P. A. M.; HENKE, S. L.; INONE, P. C.; RIBEIRO JÚNIOR, S. Deterioration rates of metal and concrete structures in coastal environment of the South and Northeast Brazil: case studies in the Pontal do Sul, PR, and Costa do Sauípe, Bahia. **Procedia Engineering**, v. 42, p. 384-396, 2012.

CHEN, A. E.; DAI, K. Modal characteristics of two operating power transmission poles. **Shock and Vibration**, v. 17, p. 551–561, 2010.

COELHO, A.; BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 338-352, 2013.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. In: **Sumário Mineral 2015**. Brasília, v. 35, p.135, 2016. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 12 mai 2018.

DU, G.; SAFI, M.; PETERSSON, L.; KAROUMI, R. Life cycle assessment as a decision support tool for bridge procurement: environmental impact comparison among five bridge designs. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, pg. 1948 -1964, 2014.

DUQUE, E. P. **Aditivos para concreto**. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. v. 07, p. 14-24, 2018.

EIRAS, D. H. M.; PEREIRA, L. T.; PAIVA, P. N. C.; GOMES, G. J. C. A importância da composição da massa asfáltica para um bom desempenho. **Revista Teccen**, v. 11, n. 2, p. 65-72, 2018.

ENGIDASEW, T. A.; BARBIERI, G. Geo-engineering evaluation of Termaber basalt rock mass for crushed stone aggregate and building stone from Central Ethiopia. **Journal of African Earth Sciences**, v. 99, p. 581–594, 2014.

ESA, M. R.; HALOG, A.; RIGAMONTI, L. Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 19, n. 3, p. 1144–1154, 2017.

FELDMAN, M.; HADJIMICHAEL T.; LANAHAN, L.; KEMENY, T. The logic of economic development: a definition and model for investment. **Environment and Planning C: Government and Policy**, v. 34, p. 5-21, 2016.

FERREIRA V. J.; VILAPLANA A. S. G.; ARMINGOL T. G.; USON A. A.; GONZALEZ C. L.; SABIRON A. M. L.; FERREIRA G. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. **Journal of Cleaner Production**. v. 130, p. 175-186, 2016.

FONSECA, F. E. A.; ROZENFELD, H. Medição de desempenho para a gestão do ciclo de vida de produtos: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Produção Online**, v.12, n. 1, p. 159-184, 2012.

FREGONARA, E.; GIORDANO, R.; FERRANDO D. G.; PATTONO, S. Economic-Environmental Indicators to Support Investment Decisions: A Focus on the Buildings' End-of-Life Stage. **Buildings**, v. 7, n. 65, p. 1-21, 2017.

FUJIMOTO, N.; HIGASHI, Y.; SAWADA, T. Corrosion Mechanism of Steel Bars in Concrete Poles. **Zairyo-to-Kankyo**, v. 64, n. 6, p. 231-234, 2015.

GARCÍA, A. D.; GARCÍA, C. M.; PALOMINO, T. C. Properties of Residue from Olive Oil Extraction as a Raw Material for Sustainable Construction Materials. Part I: Physical Properties. **Materials**, v. 10, n. 100, p. 1-15, 2017.

GEJER, L.; TENNENBAUM, C. Os três princípios da inovação circular do berço ao berço. In: **Ideia Circular**. 2017. Disponível em: <http://www.ideiacircular.com/economia-circular>> Acesso em: 08 mai 2018

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

GOEDKOOP, M.; MIERAS, E.; GAASBEEK, A.; CONTRERAS, S. How to Make the Life Cycle Assessment Team a Business Partner. In: SONNEMANN, G.; MARGINI, M., Ed(s). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Springer, 2015. p. 105-115.

GUINÉE, J. B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H. A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M. A. J. **Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards**. Kluwer Academic Publishers, 2002, 692p.

GUO, H. L; LI, H.; SKITMORE, M. Life-Cycle Management of Construction Projects Based on Virtual Prototyping Technology. **Journal of Management in Engineering**, v. 26, n. 1, pp.41-47, 2010

HAWKINS, D; MUMOVIC, D. Evaluation of life cycle carbon impacts for higher education building redevelopment: a multiple case study approach **Energy and Buildings**, v. 150, n. 1 pp. 507-515, 2017.

HEYS, G. SHARMINA, M.; MENDOZA, J. M. F.; GALLEGO-SCHMID, A.; AZAPAGIC, A. Developing and implementing circular economy business models in service-oriented technology companies. **Journal of Cleaner Production**, v.177, p.621-632, 2018.

HUIJBREGTS; M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M. D. M.; HOLLANDER, A.; ZIJP, M.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2016 v 1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. National Institute for Public Health and the Environment, 2017, 201p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades. Piauí. 2010.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/pesquisa/37/30255?tipo=ranking>. Acesso em 24 out 2020.

IBRACON. Instituto Brasileiro do Concreto. **Publicações.** Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf. Acesso em 20 set 2018.

IBRAHIM, A. M.; DAMATTY, A. A. E.; ANSARY, A. M. E. Finite element modelling of pre-stressed concrete poles under downbursts and tornadoes. **Engineering Structures**, v. 153, p. 370–382, 2017.

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

JABBOUR, A. B. L.S.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operation. **Annals of Operation Research**, v. 270, pp 273-286, 2018.

JULLIEN, A.; DAUVERGNE, M.; CERESO, V. Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. **Transportation Research Part D**, v. 29, p. 56-65, 2014.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, pp. 221-232, 2017.

KIM, T. H.; TAE, S. H. Proposal of Environmental Impact Assessment Method for Concrete in South Korea: An Application in LCA (Life Cycle Assessment). **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 13, p. 1-16. 2016.

LEBRE, E.; CORDER, G.; GOLEV, A. The Role of the Mining Industry in a Circular Economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 662-672, 2017.

LIU, Z.; ADAMS, M.; WALKER, T. R. Are exports of recyclables from developed to developing countries waste pollution transfer or part of the global circular economy? **Resources, Conservation & Recycling**, v. 136, pp. 22–23, 2018.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. **Manual de Agregados para Construção Civil.** 2ª Edição/Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MANDA, B. M. K; BOSCH, H.; WORRELL, E. Sustainable Value Creation with Life Cycle Management. In: SONNEMANN, G.; MARGINI, M., Ed(s). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment.** Springer, 2015. p. 129-146.

MAZAHIR, S.; ARDESTANI-JAAFARI, A. Robust global sourcing under compliance legislation. **European Journal of Operational Research**, v. 284, n. 1, p.152-163, 2020

MEDEIROS, B. C.; ARAÚJO, V. F. S.; SILVA OLIVEIRA, M. K. A. Life Cycle Canvas (LCC): um modelo visual para a gestão do ciclo de vida do projeto. **Revista de Gestão e Projetos – GeP**, v. 9, n. 1, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2° Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

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.

MILANI, C. J.; BOESING, R.; PHILIPPSEN, R. A.; MIOTTI, L. A. Processo produtivo de elementos pré-moldados de concreto armado: detecção de manifestações patológicas. **Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, v. 1, p. 82-91, 2012.

MONTEIRO, N. B. R.; MOITA NETO, J. M.; DA SILVA, E. A. Bibliometric study of the crushed stone mining sector. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, published online, 2018.

MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A. Circular economy in the scientific literature. In: VI Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, 2018, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: IBICT, 2018. p. 537-543.

MORALES, M. F. D.; REGULY, N.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELLO, A. C. Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 1-11.

NASIR, M. H. A.; GENOVESE, A.; ACQUAYE, A. A.; KOH, S.C.L.; YAMOAH, F. Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 443-457, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo. Bookman Editora. 2016. 887p.

OpenLCA. **Data**. 2020. Disponível em <https://www.openlca.org/lca-data/>. Acesso em 07 mar 2020.

ORTIZ, O. J. R.; TAUTA, J. F. C.; LEÓN, A. L. Caracterización mecánica de mezclas asfálticas en función del origen y gradación del agregado pétreo. **Revista Científica General José María Córdova**, v. 11, n. 12, p. 215-232, 2013.

PASSUELO, A. C.; VENQUIARUTO, S.; ABREU, A. G.; ZANINI, C.; DOMINGUEZ, A. O.; KIRCHHEIM, A. P.; DAL MOLIN D, MASUERO, A. Valorização de resíduos de ágata em argamassas e concretos: avaliação do ciclo de vida. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, p. 1-13, 2019.

PAULIUK, S. Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 129, p. 81–92, 2018

PEREIRA, L. T.; NOBREGA, P. P. C.; EIRAS, D. H. M; GOMES, G. J. C. A importância da composição da massa asfáltica para um bom desempenho. **Revista Eletrônica Teccen**, v. 11, n. 2, p. 65-72, 2018.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 3, p. 222-240, 2012.

QUARESMA, L. P. **Relatório Técnico 30. Perfil de brita para construção civil**. Projeto estatal de assistência técnica ao setor de energia. 30 P., 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/0b657545-498a-46ee-b836-a974026d435a?version=1.0. Acesso em 21 set 2020.

REBITZER, G. Introduction: Life Cycle Management. In: SONNEMANN, G.; MARGINI, M., Ed(s). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Springer, 2015. p. 3-6.

RIGAMONTI, L.; FALBO, A.; ZAMPORI, L.; SALA, S. Supporting a transition towards sustainable circular economy: sensitivity analysis for the interpretation of LCA for the recovery of electric and electronic waste. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 1278–1287, 2017.

RIVERO, A. J.; BÁEZ, A. G.; NAVARRO, J. G. Enhanced On-Site Waste Management of Plasterboard in Construction Works: A Case Study in Spain. **Sustainability**, v. 9, n. 450, p. 1-12, 2017.

ROSSI, E. **Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil**: estudo de caso. São Carlos. Universidade Federal de São Carlos. 2013. 150f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

SALEMDEEB, R.; AL-TABBAA, A.; REYNOLDS, C. The UK waste input-output table: Linking waste generation to the UK economy. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 10, p. 1089-1094, 2016

SANTIAGO, L. Economia Circular. In: **Ellen Macarthur Foundation**. 2016. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/6458684/4173222/ConceitosdeEconomiaCircular_LuisaSantiago.pdf Acesso em 15 mai 2018

SANTOLIN, R. B.; CATEN, C. S. Modelos de distritos industriais sob a ótica da sustentabilidade: uma revisão bibliográfica. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, v.7, n. 14, p.129-151, 2015.

SCHEEREN, S. C. S.; SALUM, P. L.; KIRCHHEIM, A. P.; RODRÍGUEZ, E. D. Influência de aditivos superplastificantes a base de policarboxilato na resistência a compressão e propriedades no estado fresco de um cimento Portland tipo I. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v.4, n.2, p.129-14, 2017.

SCHNEIDER, P.; ANH, L. H.; WAGNER, J.; REICHENBACH, J.; HEBNER, A. Solid Waste Management in Ho Chi Minh City, Vietnam: Moving towards a Circular Economy? **Sustainability**, v. 9, n. 286, p. 1-20, 2017.

SILVA, F. B.; OLIVEIRA, L. A.; YOSHIDA, O. S.; JOHN, V. M. Variability of environmental impact of ready-mix concrete: a case study for Brazil. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, p. 1-9, 2019.

SILVA, F. B.; REIS, D. C.; MACK-VERGARA, Y. L.; PESSOTO, L.; FENG H.; PACCA, S. A.; LASVAUX, S.; HABERT, G.; JOHN, V. M. Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 980–997, 2020a.

SILVA, F. B.; SAADE, M. R. M.; MORAGA, G. L.; YOSHIDA, O. S.; GOMES, V.; PASSUELO, A., OLIVEIRA, L. A.; SILVA, M. G.; JOHN, V. Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. **Concreto & Construções**, Ed. 98, p. 91-97, 2020b.

SMOL, M.; KULCZYCKA, J.; HENCLIK, A.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, n. 15, p. 45-54, 2015.

SONNEMANN, G.; MARGINI, M. Life Cycle Management. In: **LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. 2015. 352p.

SONNEMANN, G.; GEMECHU, E. D.; REMMEN, A.; FRYDENDAL, J.; JENSEN, A. A. Life Cycle Management: implementing sustainability in business practice. In: SONNEMANN, G.; MARGINI, M., Ed(s). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Springer, 2015. p. 7-21.

SOUZA, H. H. S. Avaliação do ciclo de vida e influência do tempo de vida útil dos postes de madeira e concreto do sistema de distribuição de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 159, 2014.

SOUZA, H. H. S, LIMA, A. M. F.; ESQUERRE, K. O.; KIPERSTOK, A. Life cycle assessment of the environmental influence of wooden and concrete utility poles based on service lifetime. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 2030–2041, 2017.

STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of cement: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1293-1299, 2016.

STROTHMANN, P.; BRICOUT, J.; SONNEMANN, G.; FAVA, J. Communication and collaboration as essential elements for mainstreaming Life Cycle Management. In: SONNEMANN, G.; MARGINI, M., Ed(s). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Springer, 2015. p. 279-291.

TAKANO, C. C.; FLORES, J. C. C.; LIMA, H. M. An Analysis of the Rate for Controlling, Monitoring and Supervision of Exploration and Mining Activities of Mineral Resources (TFRM). **Revista Escola de Minas**, v. 69, n. 1, p. 105-110, 2016.

TINGLEY, D. D.; COOPER, S.; CULLEN, J. Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 642-652, 2017.

TSUNEMOTO, M.; SHIMIZU, M.; KONDO, Y.; KUDO, T.; UEDA, H.; IIJIMA, T. Replacement criteria for concrete catenary poles. **Quarterly Report of Railway Technical Research Institute**, v. 58, n. 4, p. 270-276.

VALDERRAMA, C.; GRANADOS, R.; CORTINA, J. L.; GASOL, C. M.; GUILLEM, M.; JOSA, A. Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study. **Journal of Cleaner Production**, v. 25, p. 60-67, 2012.

VLADMIROV, V.; BICA, I. Methodology and calculation model for recycling of composite construction products. **E3S Web of Conferences**, v. 85, pp. 1-7, 2019.

YUAN, Y.; JIANG, J. Climate load model – Climate action spectrum for predicting durability of concrete structure. **Construction and Building Materials**, v. 29. P. 291-298, 2012.

APÊNDICE A – Instrumento de coleta de dados

1 As especificações e quantidades de todas as entradas de matéria-prima;

- Areia
- Brita
- Cimento
- Aditivos
- Água
- Energia elétrica
- Óleo diesel
- Traço do concreto
- Vergalhões de aço (para as indústrias de postes)
- Outros

2 As origens das entradas, dados sobre fornecedores, os tipos e quantidades de veículo e distâncias de transporte;

3 Os equipamentos e máquinas utilizados e os respectivos tempos de uso e consumo de combustível;

4 As quantidades de materiais gastos e periodicidade de operações de manutenção dos equipamentos;

5 As quantidades e tipos de resíduos, sua destinação e tratamento;

6 Tratamento de efluentes

7 Dados de produção em termos de quantidade e massas unitárias.
Produção de _____ m³ de _____ por _____(período)

8 Quantidade de funcionários

9 Tempo da empresa no mercado

10 Área ocupada pela indústria

11 Descrição do processo produtivo

12 Processo de cura

APÊNDICE B – Normas ABNT para fabricação de postes

Número da Norma	Título
ABNT NBR 8451-1:2011 Versão Corrigida:2012	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 1: Requisitos
ABNT NBR 8451-1:2011 Errata 1:2012	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 1: Requisitos
ABNT NBR 8451-1:2020 Revisada	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 1: Requisitos
ABNT NBR 8451-2:2013	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 2: Padronização de postes para redes de distribuição de energia elétrica
ABNT NBR 8451-2:2020 Revisada	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 2: Padronização de postes para redes de distribuição de energia elétrica
ABNT NBR 8451-2:2011 Emenda 1:2013	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 2: Padronização de postes para redes de distribuição de energia elétrica
ABNT NBR 8451-3:2011	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 3: Ensaio mecânicos, cobrimento da armadura e inspeção geral
ABNT NBR 8451-3:2020 Revisada	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 3: Ensaio mecânicos, cobrimento da armadura e inspeção geral
ABNT NBR 8451-4:2011	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 4: Determinação da absorção de água
ABNT NBR 8451-4:2020 Revisada	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 4: Determinação da absorção de água
ABNT NBR 8451-5:2011	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 5: Postes de concreto para entrada de serviço até 1 kV
ABNT NBR 8451-5:2020 Revisada	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 5: Postes de concreto para entrada de serviço até 1 kV
ABNT NBR 8451-6:2013	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 6: Postes de concreto armado e protendido para linhas de transmissão e subestações de energia elétrica – Requisitos, padronização e ensaios
ABNT NBR 8451-6:2020 Revisada	Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 6: Postes de concreto armado e protendido para linhas de transmissão e subestações de energia elétrica - Requisitos, padronização e ensaios complementares
ABNT NBR 8453-1:2012	Cruzetas de concreto armado e protendido para redes de distribuição de energia elétrica. Parte 1: Requisitos
ABNT NBR 8453-2:2012 Errata 1:2013	Cruzetas de concreto armado e protendido para redes de distribuição de energia elétrica. Parte 2: Padronização
ABNT NBR 8453-2:2012 Versão Corrigida:2013	Cruzetas de concreto armado e protendido para redes de distribuição de energia elétrica. Parte 2: Padronização
ABNT NBR 8453-3:2012	Cruzetas de concreto armado e protendido para redes de distribuição de energia elétrica. Parte 3: Ensaio

Fonte: ABNT Catálogo. Adaptado pelos autores