

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**LEONARDO DIAS DE ABREU**

**LEVANTAMENTO DAS POTENCIALIDADES E DESAFIOS PARA O**  
**APROVEITAMENTO DE AGREGADO SIDERÚRGICO DE ESCÓRIA DE ACIARIA**  
**EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO POR MEIO DE UMA REVISÃO**  
**SISTEMATIZADA DA LITERATURA**

**VITÓRIA**

**2023**

**LEONARDO DIAS DE ABREU**

**LEVANTAMENTO DAS POTENCIALIDADES E DESAFIOS PARA O  
APROVEITAMENTO DE AGREGADO SIDERÚRGICO DE ESCÓRIA DE ACIARIA  
EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO POR MEIO DE UMA REVISÃO  
SISTEMATIZADA DA LITERATURA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre.

Orientador:  
Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman

Coorientadora:  
Profa. Dra. Luciana Harue Yamane

**VITÓRIA**

**2023**

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de  
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

A1621 Abreu, Leonardo Dias de, 1973-  
Levantamento das potencialidades e desafios para o  
aproveitamento de agregado siderúrgico de escória de aciaria em  
países em desenvolvimento por meio de uma revisão  
sistemizada da literatura / Leonardo Dias de Abreu. - 2023.  
76 f. : il.

Orientador: Renato Ribeiro Siman.  
Coorientadora: Luciana Harue Yamane.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Resíduos Industriais. 2. Escória (Metalurgia). 3.  
Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Siman, Renato  
Ribeiro. II. Yamane, Luciana Harue. III. Universidade Federal  
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

# POTENCIALIDADES E DESAFIOS PARA O APROVEITAMENTO DE AGREGADO SIDERÚRGICO DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

## Leonardo Dias de Abreu

### Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 RENATO RIBEIRO SIMAN  
Data: 24/04/2023 15:05:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman  
Orientador - PPGEA/CT/UFES

Documento assinado digitalmente  
 LUCIANA HARUE YAMANE  
Data: 24/04/2023 15:08:27-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciana Harue Yamane  
Coorientadora - PPGES/CT/UFES

Documento assinado digitalmente  
 RODRIGO DE ALVARENGA ROSA  
Data: 24/04/2023 15:39:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa  
Examinador Interno – PPGEA/CT/UFES

Documento assinado digitalmente  
 CARMENLUCIA SANTOS GIORDANO PENTEAD  
Data: 24/04/2023 18:21:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carmenlucia Santos Giordano Penteado  
Examinadora Externa – FT/UNICAMP

Documento assinado digitalmente  
 ELISA VALENTIM GOULART  
Data: 25/04/2023 10:13:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ELISA VALENTIM GOULART  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória/ES, 24 de abril de 2023

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por todas as bênçãos recebidas e por finalizar este tão sonhado mestrado, amparando-me em secreto nos momentos mais difíceis durante esta jornada. À Ele toda honra e glória!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha amada esposa Liana Jacomini, que sempre esteve ao meu lado, esse mestrado também é seu, mulher forte e virtuosa, que vive de acordo com os princípios e a vontade de Deus, dedicando a sua vida ao Senhor, fazendo a diferença na vida de nossa família e na vida do próximo.

Agradeço aos meus filhos, João e Pedro, nossos tesouros, hoje com 7 e 4 anos, mesmo sem entenderem as nossas ausências devido às jornadas da vida, nunca murmuraram, sempre alegres. Quando olho para os seus olhos, me lembro quando os tive em meus braços pela primeira vez e como o meu mundo se transformou, para melhor.

Agradeço aos meus amados pais, Antonio Carlos e Marlene, pela dedicação, carinho e o amor que vocês sempre depositaram em mim.

Agradeço ao meu sogro e à minha sogra, Sebastião e Neuza Jacomini, meus segundos pais aqui na terra, por todo amor e carinho.

Agradeço aos queridos professores Renato Siman e Luciana Yamane pela dedicação, carinho e por todo aprendizado! Vocês transformam o mundo através do conhecimento que transmitem. O teólogo e escritor holandês Erasmo de Roterdã disse “A primeira fase do saber é amar os nossos professores”. Eu os amo em Cristo.

Agradeço à minha amiga Tânia Galavote, doutoranda, pela disponibilidade nos momentos que precisei, nossa parceria é baseada na confiança mútua de que juntos caminhamos na mesma direção e dividimos os mesmos ideais.

Agradeço aos professores Rodrigo Alvarenga e Carmenlucia Santos, me sinto honrado por aceitarem fazer parte da comissão avaliadora e deste momento importante em minha vida.

## RESUMO

Como resultado da crescente demanda mundial por agregado natural no setor de construção civil, percebe-se a busca pela substituição por agregados reciclados produzidos a partir da escória de aciaria em obras públicas de infraestrutura. No entanto, as barreiras legais, ambientais, econômicas, de monitoramento e controle têm sido reportadas como dificultadoras do emprego desses resíduos restando seu destino para aterro industrial em países em desenvolvimento. Desta forma, para trazer luz às principais dificuldades reportadas na literatura, foi realizada uma revisão bibliográfica e documental sistematizada, delimitada no período 2019 a 2022, empregando a ferramenta *Smart Bibliometrics*. Dentre as principais barreiras, destacam-se a falta de políticas públicas ou transparência e instabilidade daquelas que existem, indisponibilidade de dados sobre manejo de resíduos industriais, ausência de diretrizes ambientais específicas para reutilização e reciclagem destes resíduos, condições econômicas desafiadoras, infraestrutura envelhecida e estruturas de suporte à decisão indisponíveis para apoiar e orientar as decisões de gestão. A partir disso, buscou-se representar, por meio de um diagrama de causa e efeito, as interrelações entre os elementos identificados na literatura e o aproveitamento da escória de aciaria. Os resultados, a partir dessa pesquisa, demonstraram que os elementos políticos e normativos foram aqueles que apresentaram a maior frequência de citações no que tange ao fomento do uso de escória de aciaria, sendo verificada presença significativa em 58% dos artigos, em seguida os elementos econômicos (24%), os elementos operacionais (13%) e por fim os elementos físicos (5%). Os elementos políticos e normativos, especificamente em termos de obrigatoriedade, são preferidos e geralmente possuem maior relevância em relação aos demais, sendo os que mais tem influenciado para um maior aproveitamento, além de apresentarem uma série de aspectos potencialmente positivos para o uso de agregados alternativos.

## ABSTRACT

As a result of the growing worldwide demand for natural aggregate in the civil construction sector, there is a search for replacement of recycled aggregates originated by the steel slag production in public infrastructure works. However, legal, environmental, economic, monitoring and control barriers have been reported as hindering the use of this waste, leaving its destination for industrial landfills in developing countries. Thus, to shed light on the main difficulties reported in the literature, a systematic bibliographic and document review was carried out, delimited in the period 2019 to 2022, using the *Smart Bibliometrics* tool. Among the main barriers, the lack of public policies or transparency and instability of those that exist, unavailability of data on industrial waste management, lack of specific environmental guidelines for the reuse and recycling of these wastes, challenging economic conditions, aging infrastructure and structures stand out, decision support tools unavailable to support and guide management decisions. From this, was represented through a cause-and-effect diagram, the interrelations between the elements identified in the literature and the use of steel slag. The results, based on this research, demonstrated that the political and normative elements were those that presented the highest frequency in citations regarding the promotion of the steel slag use, with a significant presence verified in 58% of the articles, followed by the elements economic (24%), operational elements (13%) and finally physical elements (5%). Political and normative elements, specifically in terms of obligation, are preferred and generally have greater relevance in relation to the others, being the ones that have most influenced greater use, in addition to presenting a series of potentially positive aspects for the use of alternative aggregates.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da produção de aço bruto em 2021 entre os países associados ao <i>World Steel Association</i> .. .....	21
Figura 2 – Principais resíduos de uma aciaria em uma siderúrgica integrada e principais aplicações para o AEA.. .....	22
Figura 3 – Relações entre elementos políticos e normativos, econômicos, físicos, operacionais e outros elementos (partes interessadas e controle fiscal) no aproveitamento do AEA.....	48
Figura 4 – Quatro ciclos de feedback do DCE.....	50

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composições químicas médias (%) das escórias de aciaria e do cimento Portland. .....	19
Tabela 2 – Taxa de utilização de agregados siderúrgicos no ano de 2020, nas regiões e países maiores produtores de aço no mundo.....	21
Tabela 3 - Tipos de aplicação (em %) dos AEA no Brasil .....	22

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Fluxo metodológico e objetivos da presente pesquisa .....	24
Quadro 2 - Etapas da pesquisa sistematizada.....	28
Quadro 3- Potencialidades e desafios para o aproveitamento de AEA com base nos principais elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais, identificados na literatura.....	34

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
3.1	VISÃO GERAL DO SETOR SIDERÚRGICO .....	18
3.1.1	<i>Agregado siderúrgico de escória de aciaria.....</i>	<i>19</i>
3.1.2	<i>Aplicações consolidadas de AEA e a produção de aço no Brasil e no mundo</i>	<i>20</i>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
4.1	APRESENTAÇÃO DA PESQUISA.....	24
4.2	FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA .....	24
4.2.1	<i>Revisão Sistemática da Literatura.....</i>	<i>24</i>
4.2.2	<i>Diagrama de causa e efeito (DCE) .....</i>	<i>29</i>
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DA PESQUISA .....</b>	<b>30</b>
5.1	ETAPA 1 – PESQUISA SISTEMÁTICA DA LITERATURA .....	30
I.	<i>Pesquisa Bibliográfica.....</i>	<i>30</i>
II.	<i>Pesquisa documental .....</i>	<i>32</i>
5.2	ETAPA 2 – DESCRIÇÃO DAS RELAÇÕES DE CAUSALIDADES ENTRE OS ELEMENTOS IDENTIFICADOS NA LITERATURA E O APROVEITAMENTO DO AEA .....	32
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
i.	<i>Pesquisa sistemática da literatura.....</i>	<i>33</i>

ii.	<i>Elementos Políticos e Normativos</i> .....	35
iii.	<i>Elementos Econômicos</i> .....	41
iv.	<i>Elementos físicos e operacionais</i> .....	45
v.	<i>Descrição das relações de causalidades entre os elementos identificados na literatura e o aproveitamento do AEA</i> .....	46
7	<b>CONCLUSÕES</b> .....	53
8	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	55

## 1. INTRODUÇÃO

Embora a legislação ambiental mundial seja rigorosa em disciplinar a atividade humana para a proteção do meio ambiente, o esgotamento dos recursos naturais de agregados como a areia, o cascalho e o pedregulho irão gerar a escassez destes materiais para a construção civil (KIM *et al.*, 2021).

Diante disso, a indústria siderúrgica vem contribuindo com o desenvolvimento sustentável da construção, a medida em que pode oferecer subprodutos úteis para a produção de concreto, sendo possível desenvolver agregados alternativos, a exemplo do agregado de escória de aciaria (AEA) (KIM *et al.*, 2021; MARTINS *et al.*, 2021).

Após processo de beneficiamento, o AEA apresenta alta dureza e resistência ao desgaste, maior resistência à compressão, além de textura superficial abundante, tornando-o ideal para ser utilizado, por exemplo, na metalurgia, na extração de elementos valiosos, na indústria da construção civil como aglutinante, na fabricação de fertilizantes, mistura para fabricação de asfalto e em sistemas de purificação de água (COSTA, L. *et al.*, 2022; PILONETA *et al.*, 2022; GOLI, A. 2022; CUI *et al.*, 2021; DAI *et al.*, 2021; OLOFINNADE *et al.*, 2021; NUNES *et al.*, 2021; SWATHI, M. *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020; FISHER *et al.*, 2019; SHARBA, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; KIM *et al.*, 2021). Contudo, a engenharia rodoviária tem sido o principal campo de aplicação de AEA (CUI *et al.*, 2021).

Apesar das diversas possibilidades de aproveitamento, a utilização do AEA pode apresentar-se de maneira diversificada entre os países e seus substratos econômicos, sendo que enquanto naqueles desenvolvidos, o AEA tem um percentual de reciclagem, em média, maior do que 80%, em outros países subdesenvolvidos, como no Brasil, a reciclagem representa, em média, apenas 22% das destinações (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018), demonstrando potencialidades de crescimento de mercado nesses locais como promissora fonte de matéria prima secundária. Entretanto, a falta de incentivo ao uso de AEA e a carência de legislação direcionada podem ser alguns dos principais desafios para a reutilização em larga escala de AEA, devido principalmente à indefinição e dificuldade de diferenciação entre subprodutos/coprodutos de resíduos/rejeitos (NUNES *et al.*, 2021).

Para Perteghella *et al.* (2022), os métodos de avaliação da gestão de resíduos sólidos que analisam simultaneamente as dimensões econômica, social e ambiental são limitados, além das ferramentas serem raramente aplicadas em países em desenvolvimento.

Além disso, a incorporação das partes interessadas na maioria das ferramentas e processos de tomada de decisão, bem como a disponibilidade de dados confiáveis em países em desenvolvimento são muitas vezes limitados (PERTEGHELLA *et al.*, 2022).

As normas técnicas publicadas no Brasil (ABNT NBR NM 52:2003; ABNT NBR NM 53:2003 e ABNT NBR 7211:2005) para a utilização de AEA em pavimentação evidenciam sua viabilidade técnica para tal emprego, todavia, a ausência de uma política pública para cumprimento compulsório, de diretrizes ambientais padronizadas, de uma tributação ou subvenção ambiental associadas a mecanismos adicionais de apoio às empresas retardam seu emprego (BORGES, 2020; GHOSH *et al.*, 2020; GHOSH *et al.*, 2019).

Por outro lado, as tecnologias e os protocolos ambientais empregados na gestão de resíduos sólidos na indústria siderúrgica são desenvolvidas para a utilização lucrativa destes resíduos na fabricação de produtos convencionais ou no desenvolvimento de novos produtos (SARKAR *et al.*, 2015). Entretanto, a escassez no oferecimento de incentivos econômicos ou de desoneração fiscal para empresas que fazem o beneficiamento de escória reduz a taxa de utilização e aplicação do AEA (GUO *et al.*, 2018).

Sellitto e Almeida (2019) analisaram alternativas para o compartilhamento de subprodutos/coprodutos no setor de metais e metalurgia como estratégia de gestão ambiental. Segundo os autores, foram reportadas barreiras como custos logísticos excessivos para reaproveitamento externo e falta de benefícios econômicos para fazê-lo, bem como incertezas legais que pudessem estimular o encaminhamento para outras indústrias, tornando os processos de destinação complexos e demorados.

Para esses casos, Swathi *et al.* (2021) descrevem a necessidade de regulamentações ambientais claras, cruciais para o aproveitamento dos resíduos gerados pelas indústrias siderúrgicas.

Embora os estudos abordem amplamente novos tipos de aplicação e a busca por melhorias nas propriedades físico-químicas do AEA, além de tratar principalmente dos resíduos sólidos industriais, a literatura carece de sistematização daquela bibliografia que esclareça as principais

barreiras que dificultam o aproveitamento de AEA principalmente em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Neste contexto, a presente pesquisa busca elucidar as potencialidades e os desafios baseados nas dimensões políticas, normativas, físicas, econômicas e de monitoramento e controle que impactam no aproveitamento do AEA em aplicações já consolidadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral da pesquisa é descrever as potencialidades e os desafios para o aproveitamento de AEA em países em desenvolvimento através da influência, positiva ou negativa, de elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para alcançar o objetivo geral, deve-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Descrever os principais elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais, identificados na literatura, e suas relações com o reaproveitamento do AEA, para aqueles casos com viabilidade técnica comprovada no Brasil e no mundo.
- Representar, por meio de um diagrama de causa e efeito (DCE), as interrelações entre os elementos identificados na literatura e o aproveitamento do AEA.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica contextualiza uma visão geral da siderurgia, os agregados siderúrgicos com foco nos AEA, aplicações consolidadas de AEA e a produção de aço no Brasil e no mundo.

#### 3.1 VISÃO GERAL DO SETOR SIDERÚRGICO

Cerca de 70% do total do aço produzido no mundo ocorre em usinas siderúrgicas integradas, baseadas no alto forno, onde o minério de ferro é reduzido a ferro-gusa, e este posteriormente é convertido em aço no forno básico de oxigênio (BRANCA *et al.*, 2020).

Os outros cerca de 30% do total é produzido através de uma segunda rota, em usinas siderúrgicas semi-integradas baseadas principalmente em fornos elétricos a arco, que utilizam sucata de aço como principal insumo ou gusa sólido e energia elétrica como fonte de energia (BRANCA *et al.*, 2020).

Na rota integrada existem pátios de matérias-primas destinados ao recebimento, beneficiamento granulométrico, estocagem e homogeneização das matérias-primas e insumos utilizados na produção de aço (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

Nas usinas integradas tem-se as unidades coqueria, sinterização e alto forno que não existem na rota semi-integrada. A coqueria é responsável pela produção do coque, que é o produto da destilação e aglomeração do carvão mineral e é o insumo redutor do minério de ferro carregado no alto-forno. A sinterização é a unidade destinada à aglomeração de finos de minério de ferro para carregamento no alto-forno e neste processo, os finos de minério são misturados com finos de carvão e de calcários e carregados na esteira de sinterização para produção do sinter. O alto forno é a unidade destinada à produção de ferro-gusa líquido, o qual será transformado em aço líquido na etapa seguinte do processo que é a aciaria, que é unidade onde existem máquinas e equipamentos voltados para o processo de transformar o ferro gusa e a sucata em diferentes tipos de aço (LOPEZ *et al.*, 2022; SŁOWIK *et al.*, 2021; DONG *et al.*, 2021; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

Nas usinas semi-integradas tem-se a aciaria elétrica, onde se produz aço a partir da fusão de uma carga metálica ferrosa e fundentes em fornos elétricos a arco (LOPEZ *et al.*, 2022; SŁOWIK *et al.*, 2021; DONG *et al.*, 2021; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

O lingotamento contínuo, etapa posterior, é a unidade responsável pela transformação do aço líquido em produtos semiacabados sólidos (placas de aço) nas dimensões especificadas. Por fim, tem-se a unidade de laminação, processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal da placa por compressão do metal, através da passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos tendo como principais produtos chapas e bobinas laminadas a quente ou a frio (SŁOWIK *et al.*, 2021; DONG *et al.*, 2021; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

### 3.1.1 Agregado siderúrgico de escória de aciaria

O agregado siderúrgico de escória de aciaria deve atender a parâmetros de controle que norteiem o seu reaproveitamento sistemático, como, por exemplo, o uso em obras de infraestrutura, principalmente em usos consolidados como em obras rodoviárias, lastro ferroviário ou na produção de artefatos de concreto (DAI *et al.*, 2022; NGUYEN *et al.*, 2022; FU *et al.*, 2022; VÁCLAVÍK *et al.*, 2020; GUO *et al.*, 2019).

A composição do AEA é semelhante à composição do clínquer de cimento (Tabela 1) e isso demonstra ser um recurso potencial, que pode ser usado como material cimentício complementar para materiais de construção e trazer benefícios ambientais e econômicos significativos (DAI *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Composições químicas médias (%) das escórias de aciaria e do cimento Portland

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI*	Outros
<b>AS de escória de Aciaria</b>	40,21	17,18	3,05	21,72	7,22	0,91	2,77	3,14	2,81	0,99
<b>Cimento Portland</b>	61,82	23,74	6,76	4,51	1,36	0,28	-	-	0,14	1,39

Fonte: DAI *et al.*, 2022 (\*Loss on ignition: Perda por ignição)

As escórias de aciaria têm um potencial expansivo como fator limitante para sua reutilização direta em base e revestimento primário de rodovias, e seu uso sem beneficiamento de forma adequada pode acarretar problemas de durabilidade e desempenho quando aplicada em estradas e rodovias (DE MENDONÇA *et al.*, 2016).

Diferentemente de outros resíduos gerados nos processos siderúrgicos, como a escória de alto forno, o AEA precisa ser estocada em pilhas expostas ao ar livre para que passem por um processo de estabilização química promovida pelo intemperismo natural (DE MENDONÇA *et al.*, 2016).

O processo de beneficiamento passa pela britagem, separação de metálicos e separação granulométrica, e a outra parte é sucata que é reaproveitada nos processos internos como na própria aciaria. Através da exposição à chuva e ao ar ocorre a hidratação e estabilização dos óxidos expansivos ainda presentes na EA beneficiada, tornando esta uma solução econômica e ambientalmente vantajosa (NGUYEN *et al.*, 2022; DE MENDONÇA *et al.*, 2016).

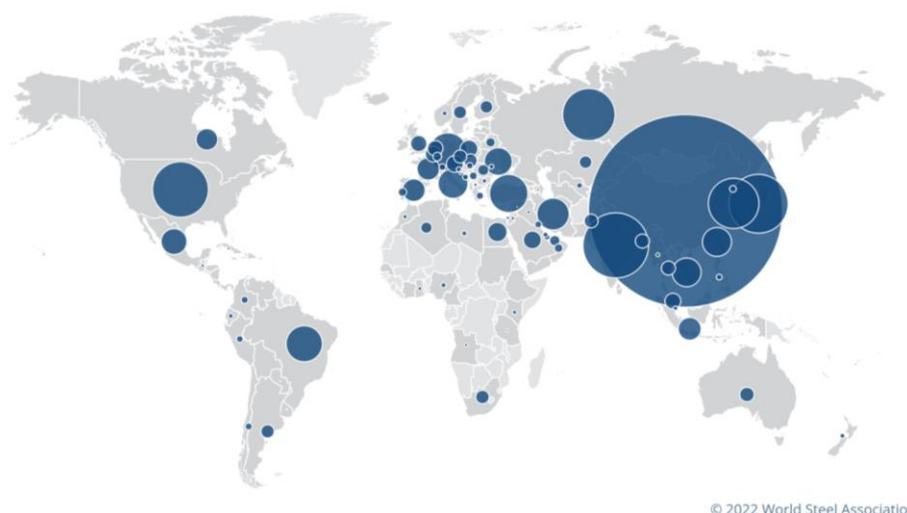
### **3.1.2 Aplicações consolidadas de AEA e a produção de aço no Brasil e no mundo**

A literatura descreve viabilidades técnicas para aplicações dos AEA na fabricação de asfalto, construção de estradas, matéria-prima para material de cobertura e isolamento, tratamento de água, filtros, artefatos de concreto, enchimentos de materiais cimentícios, bem como reciclagem de ferro e correção do solo na agricultura (LI *et al.*, 2022; FU *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2020; GUO, BAO & WANG, 2018). A utilização de concreto com AEA pode aliviar a demanda por areia natural e material de cascalho na construção (FU *et al.*, 2022).

Para Machado *et al.* (2020), os estudos sobre AEA focam em três áreas-chave: fabricação de materiais de construção, na recuperação de metais valiosos e em aplicações ambientais.

O crescimento significativo da rede rodoviária em todo o mundo tem aumentado a necessidade de materiais de pavimentação originais a partir de recursos naturais não renováveis, cuja crescente demanda tem causado problemas ambientais devido à demanda energética e risco de esgotamento destes recursos (GOLI, 2022).

A Figura 1 ilustra a distribuição da produção mundial de aço no ano de 2021, enquanto a Tabela 2 descreve a taxa de utilização de agregados siderúrgicos no ano de 2020, com exemplos de aplicação em termos percentuais nas principais regiões e países produtores de aço no mundo.

Figura 1 - Distribuição da produção de aço bruto em 2021 entre os países associados ao *World Steel Association*

Fonte: *World Steel Association* (2021)

Tabela 2 – Taxa de utilização de agregados siderúrgicos no ano de 2020, nas regiões e países maiores produtores de aço no mundo

Região / País	Taxa de utilização	Exemplos de aplicação				
		Construção de estradas	Engenharia Civil	Produção de cimento	Agricultura	Disposição final em aterros industriais
<b>Japão</b>	98,4%	32%	31%	3,4%	3,1%	1,6%
<b>Estados Unidos</b>	85%	60%	16%	3,3%	–	15%
<b>Europa</b>	87%	43%	3%	5%	3%	13%
<b>China</b>	40%	2,6%	10,1%	9,3%	–	60%
<b>Índia</b>	30%	–	–	–	–	70%

Fonte: DONG *et al.* (2021)

Embora a China tenha sido o país com maior produção mundial de aço nos anos de 2020 e 2021 (vide Figura 1), com produções respectivas de 1,053 e 1,033 bilhão de toneladas, sua taxa de utilização de resíduos como agregado siderúrgico, por exemplo em 2020, foi de apenas 40%.

Por outro lado, países desenvolvidos como o Japão, os Estados Unidos da América e países que integram a União Europeia, apesar de produzirem quantidades de aço muito menores, utilizaram, respectivamente, 98,4%, 87% e 85% como agregado siderúrgico (vide Tabela 2).

A rota integrada no Brasil, que é a rota que consiste na transformação do minério de ferro em aço e deste em produtos finais, representa mais de 80% da produção total de aço neste país, sendo que os outros 20% da produção de aço ocorrem através da rota semi-integrada que utiliza principalmente sucata ferrosa para a produção de aço (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021). Os tipos de aplicação no Brasil, em valores percentuais, estão na Tabela 3.

Tabela 2 - Tipos de aplicação (em %) dos AEA no Brasil

Aplicações	2021
Base e sub-base de estrada	78%
Nivelamento de terreno	8%
Outros	11%
Agricultura	3%
Agregados de concreto	1%

Fonte: Instituto Aço Brasil (2021)

Nota: As vias rurais pavimentadas são denominadas rodovias e as não pavimentadas são as estradas. Entende-se pavimento como qualquer tipo de cobertura do solo, podendo ser o asfalto ou pedregulhos, por exemplo.

No ano de 2021, o Brasil ocupou a 9ª posição no ranking mundial de produção de aço e, apesar da taxa de utilização, em média, para todos os resíduos siderúrgicos gerados no Brasil ter sido cerca de 93% nos anos de 2020 e 2021, ainda existe 5% do total indo para disposição final em aterros industriais e 2% em estoque, que possivelmente também irão para aterros (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

Logo, considerando o total de 36,2 milhões de toneladas de aço bruto produzido no Brasil em 2021, esses 7% correspondem a cerca de 2,5 milhões de toneladas de resíduos siderúrgicos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021), demonstrando que há ainda muitos desafios a serem superados para o fomento do reuso e reciclagem. Sem contar os dados que não foram reportados das empresas que não são afiliadas ao Instituto Aço Brasil.

Os principais resíduos gerados na unidade aciaria de uma usina siderúrgica integrada e as principais aplicações para o AEA, especialmente no Brasil, estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Principais resíduos de uma aciaria em uma siderúrgica integrada e principais aplicações para o AEA



Fonte: ArcelorMittal Brasil (2019)

Apesar das possibilidades de reaproveitamento apresentadas na Figura 2, uma parte da escória ainda é disposta em aterros industriais (DAS *et al.*, 2021; FU, Q. *et al.*, 2022). A disposição final ou mesmo o uso de AEA em aterros industriais para, por exemplo, recobrimento de célula, apesar de aceita sob o ponto de vista legal, desperdiça recursos valiosos (SONG *et al.*, 2021). Daí, a necessidade de estudos que especifiquem que elementos influenciam no aproveitamento de AEA a fim de subsidiar sistemas de apoio a tomadas de decisão.

Nesse sentido, elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais têm se tornado uma ferramenta importante, que podem influenciar de maneira positiva o aumento do reaproveitamento de AEA.

A pesquisa sistemática neste trabalho se restringiu aos usos em obras de infraestrutura com viabilidade técnica comprovada, como exemplos: obras rodoviárias (ruas, vias, rodovias e estradas vicinais como base e sub-base), nivelamento de terreno, lastro ferroviário, artefatos de concreto, material cimentício complementar para materiais de construção, fabricação de asfalto, matéria-prima para material de cobertura e isolamento, tratamento de água, adutora, drenagem de águas pluviais, diferentes tipos de aterros, canal, drenagem urbana, módulo sanitário, rede de coleta de esgoto, rede de distribuição de água e esgotamento sanitário.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho se enquadra na Área de Concentração de Saneamento Ambiental, na linha de pesquisa de Saneamento, Energia e Recuperação de Produtos, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), desenvolvida pelo Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (LAGESA). O trabalho foi orientado para seguir o fluxo metodológico apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Fluxo metodológico e objetivos da presente pesquisa

<b>OBJETIVO GERAL</b>		
O objetivo geral da pesquisa é descrever as potencialidades e os desafios para o aproveitamento de AEA em países em desenvolvimento através da influência, positiva ou negativa, de elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais.		
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>ETAPAS</b>	<b>METODOLOGIAS E FERRAMENTAS</b>
Descrever os principais elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais, identificados na literatura, e suas relações com o reaproveitamento do AEA, para aqueles casos com viabilidade técnica comprovada no Brasil e no mundo.	1	Pesquisa sistemática da literatura: bibliográfica e documental (período 2019 a 2022*).  Mapeamento científico e análise bibliométrica com o <i>Smart Bibliometrics</i> .  Mendeley.
Representar, por meio de um diagrama de causa e efeito (DCE), as interrelações entre os elementos identificados na literatura e o aproveitamento do AEA.	2	<i>Software Vensim PLE®</i> (VENTANA SYSTEMS, 2021).

Fonte: Os autores, 2021

\*Escolhido este período para abranger a literatura, os documentos e as opiniões mais recentes sobre o assunto. Sem desconsiderar os de anos anteriores, que fossem relevantes para este trabalho de pesquisa.

### 4.2 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA

#### 4.2.1 Revisão Sistemática da Literatura

A metodologia empregada para a pesquisa de dados secundários foi de revisão sistemática da literatura (RSL), sendo possível verificar o estado da arte do tema pesquisado, bem como a identificação de lacunas para os objetivos dessas pesquisas (BEHERA; BALA; DHIR, 2019; KAUR *et al.*, 2020). Logo, foi utilizado a RSL como um método.

Dessa forma, a pesquisa seguiu a abordagem proposta por Hina *et al.* (2021), seguindo as seguintes etapas: (1) planejamento da revisão: estabelecer as perguntas de pesquisa a serem

respondidas, termos de busca e a base de dados consultadas; (2) definição dos critérios de triagem: definir os critérios de exclusão e inclusão; (3) pesquisa e extração dos dados: extração dos resultados encontrados com base nos critérios de inclusão e exclusão, e análise do conteúdo; (4) análise dos dados: apresentação dos resultados encontrados de forma sintética e resumida.

A abordagem de revisão sistemática da literatura pode ser uma maneira útil de recuperar sistematicamente artigos de pesquisa de bancos de dados de literatura, analisá-los de acordo com a sistematização pré-definida e obter insights úteis (ZUIDERWIJK *et al.* 2020; FECHER *et al.*, 2015).

É reconhecido que na pesquisa documental podem ser obtidas fontes primárias de dados (relatórios, tabelas estatísticas, documentos oficiais, textos jornalísticos, revistas etc.), desprovidas de tratamento analítico. Já na pesquisa bibliográfica as fontes podem ser secundárias (artigos de revisão bibliográfica) ou terciárias (bases de dados bibliográficos), que podem abranger toda a bibliografia já publicada em relação ao tema e aos termos de busca, chaves para a formação do portfólio bibliográfico (LAKATOS *et al.* 2007; PIZZANI *et al.*, 2012).

A escolha das plataformas de pesquisa se deu pela relevância e pelo acervo. As plataformas *Scopus* e *Web of Science* fornecem ferramentas de análise de busca que podem produzir figuras representativas (ALRYALAT *et al.*, 2019).

A *Web of Science*, por exemplo, conecta publicações e pesquisadores por meio de citações e indexação controlada em bancos de dados com curadoria que cobre todas as disciplinas (CLARIVATE, 2022) e sua escolha deveu-se à sua relevância, uma vez que abrange mais de 33000 periódicos e possibilita a busca de autores reconhecidos na área de interesse, além de ser de livre acesso às instituições públicas de pesquisa brasileiras (MOTTA *et al.*, 2012).

A pesquisa em artigos também ocorreu por meio da bibliometria, realizada com a ferramenta *Smart Bibliometrics*, que faz uma revisão sistemática e reproduzível baseada em dados estatísticos, auxiliando em uma revisão bibliográfica mais objetiva (PESSIN *et al.*, 2022).

A Bibliometria Inteligente visa agregar uma métrica com significativa capacidade de classificação de documentos científicos, ao mesmo tempo em que apresenta visualizações estrategicamente desenhadas para apoiar escolhas lógicas, devido à seleção de um portfólio bibliográfico de alto padrão (PESSIN *et al.*, 2022).

Essa metodologia incorpora o sistema denominado "*Smart Bibliometrics*" baseado em recursos de computação em nuvem e inteligência artificial desenvolvidos em uma plataforma tecnológica capaz de atender às necessidades da era da "*big data*" (H. Chen *et al.*, 2018). É um método integrado de *science mapping* e análise bibliométrica. Seu *link* é de livre acesso, dispensando a instalação de qualquer outro *software* ou qualquer conhecimento prévio em gerenciamento de dados. Além disso, preserva o histórico de atualizações dos usuários permitindo o agendamento de atualizações incrementais.

O sistema *Smart Sibliometrics* conta com recursos de computação em nuvem, de tal forma que basta o acesso à plataforma a partir de um dispositivo com conexão à internet, validado por acesso restrito e controlável para integrar equipes e grupos de estudo (PESSIN *et al.*, 2022).

Permite a automação de processos por meio de um sistema que combina uma métrica delimitada para classificação de documentos científicos com visuais estrategicamente desenvolvidos que facilitam o processo de tomada de decisão na perspectiva dos cientistas. Ele também fornece todo um conjunto de análises, com foco na relação entre revistas especializadas, sujeitos de pesquisa e autores. Esse sistema foi baseado em *Business Intelligence* (BI), visando a inteligência reversa na tomada de decisões. Ele permite as interações dos usuários enquanto pesquisam relatórios, fornecendo visuais diferentes para gerar vários *insights* (PESSIN *et al.*, 2022).

De acordo com López-Robles (2019) a definição de BI pode ser entendida como a coleta, análise, interpretação e disseminação de informações de alto valor sobre áreas estratégicas, que são transmitidas no momento certo aos tomadores de decisão.

Dado que o propósito da inteligência é obter valor real dos dados, informações e do dinamismo das organizações, o estudo desta disciplina oferece uma oportunidade para analisar as tendências centrais relacionadas à coleta e processamento de dados, gestão da informação, processo de tomada de decisão e capacidades organizacionais (LÓPEZ-ROBLES *et al.*, 2019).

SIMAN *et al.* (2021) utilizaram pesquisa sistemática da literatura facilitando a análise de publicações quanto ao uso da dinâmica de sistemas na gestão de resíduos sólidos urbanos. YAMANE *et al.* (2021) utilizaram pesquisa sistemática da literatura como forma útil de recuperar sistematicamente artigos de pesquisa de bancos de dados de literatura com publicações relacionadas a políticas públicas para o aumento da cobertura das coletas de resíduos sólidos urbanos secos por catadores de material reciclado a partir da escolha de um

conjunto de termos de busca nas bases de dados Scopus e Web of Science. SANTOS *et al.* (2022) também utilizaram pesquisa bibliográfica de artigos científicos em bases de dados online (*Web of Science* e *Scopus*) permitindo identificar 20 artigos relevantes de 2008 a 2021.

*O sistema Smart Bibliometrics* é escalável e pode ser replicado em diversas instituições que tenham interesse na metodologia apresentada. Fomos os primeiros a utilizar o protótipo deste sistema, além das primeiras versões no ano de 2022, conjuntamente com outros pesquisadores do LAGESA e do seu próprio criador, Vilker Pessin, engenheiro civil, administrador de empresas e na época aluno do mestrado profissional em engenharia de desenvolvimento sustentável na UFES. A ferramenta facilita a vida dos pesquisadores e fomenta o avanço das ciências nas mais diversas áreas do conhecimento.

Os trabalhos citados mostraram que a partir do portfólio final de artigos foi possível identificar os autores, artigos e revistas mais relevantes em relação aos temas dos estudos. Os autores também descreveram que os métodos e ferramentas utilizados em suas pesquisas abrangeram meios variados para uma pesquisa mais ampla ou mais específica de dados principais ou secundários enriquecendo o trabalho, além de apontar a necessidade de estreitar a pesquisa, para que haja uma coleta efetiva de dados, seja por termos, citações ou ano de publicação.

O Quadro 2 mostra as etapas da pesquisa sistemática.

Quadro 2 - Etapas da pesquisa sistemática

Etapa metodológica	Objetivos Específicos	Ferramentas	Bases de dados	Termos de busca – português	Termos de busca – inglês
Etapa 1 – Pesquisa sistemática da literatura	Realizar uma revisão bibliográfica e documental sistemática delimitada no período 2019 a 2022 empregando a ferramenta <i>Smart Bibliometrics</i> .	Pesquisa sistemática da literatura: bibliográfica e documental. Mapeamento científico e análise bibliométrica com o <i>Smart Bibliometrics</i> . Mendeley.	Web of Science, Scopus, BDTD e SciELO. Relatórios, bancos de dados públicos e publicações seriadas de instituições ligadas ao setor siderúrgico.	Aço – produção de aço – siderurgia – coproduto – indústria – fábrica - escória – escória de aciaria – escória ferrosa – escória de alto-forno - agregado – escória granulada - escória cristalizada – resíduo siderúrgico – infraestrutura – engenharia civil – construção – obras – quantidade – geração – reuso - reciclagem	<i>steel – steelmaking process – siderurgical – industry – sintering – coproduct – byproduct – factory – slag – slag converter – BOF slag – ferrous slag – LD slag – BF slag – aggregate granulated slag – crystallized – steel aggregate – aggregate waste – siderurgic residue – infrastructure – civil engineering – construction – works – quantity – generation – reuse – recycling</i>
	Descrever um <i>background</i> quanto ao setor siderúrgico, sobre o AEA, a produção de aço mundial e as aplicações com foco nos usos com viabilidade técnica comprovada no Brasil e no mundo em substituição a outros tipos de agregado em obras de infraestrutura, a partir de ampla pesquisa sistemática da literatura.			infraestrutura – engenharia civil – construção – estrada – rodovia – mistura asfáltica – cobertura de aterro – barragens – agrícola – agricultura – aplicações – adutora – drenagem urbana – drenagem de águas pluviais – estrada não pavimentada – estrada pavimentada – ruas – avenidas – módulo sanitário – rede de coleta de esgoto – rede de distribuição de água - rede coletora de esgoto – esgotamento sanitário	<i>infrastructure – public infrastructure works – civil engineering – construction – road – highway – asphalt mixture – landfill cover – dams – agricultural – agriculture – applications- water main – urban drainage – rainwater drainage – unpaved road – paved road – streets – avenues – sanitary module – sewage collection network – water distribution network – sanitary sewage</i>
	Descrever os principais elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais, identificados na literatura, e suas relações com o reaproveitamento do AEA, para aqueles casos com viabilidade técnica comprovada no Brasil e no mundo.		Web of Science, Scopus, BDTD e SciELO.	Gestão – políticas públicas – legislação – lei – aspectos legais – normas – normativas – ambiental – risco – supervisão – inspeção – licenciamento – autorização – permissão – diretrizes – padrões internacionais – normativas – normas – certificação – auditoria – objetivos – metas – políticas da empresa – instrumentos – condições – incentivos – benefícios – taxa – desoneração fiscal – reciclagem – reuso – recursos – conservação – geração – exploração – resíduos industriais – resíduos – propriedades – manufatura	<i>management – public policies – legislation – law – legal aspects – normative – norms – environmental – risk – supervision – inspection – licensing – permit – authorization – permission – directives – international standards – normative – certification – audit – target – goal – company statute – instruments – conditions – incentives – subsidies – levy – benefit – taxes – tax relief – fees floating – pricing strategies - recycling – reuse – opportunities -resources -conservation – generation – exploration – industrial waste - residues - properties – manufacturing</i>
Etapa 2 – Descrição das relações de causalidades entre os elementos identificados na literatura e o aproveitamento do AEA	Representar, por meio de um diagrama de causa e efeito (DCE), as interrelações entre os elementos identificados na literatura e o aproveitamento do AEA.	Software Vensim PLE® (VENTANA SYSTEMS, 2021).		dinâmica de sistemas, metodologia, método, tomada de decisão, loop, causa, causal, efeito, simulação, problema, situação, cenário, opinião	<i>system dynamics, methodology, methods, decision, making, loop, cause, causal, diagram, effect, simulation, problem, situation, scenario, feedback</i>

Fonte: Os Autores (2022).

Legenda: AEA = Agregado de Escória de Aciaria; DCE = Diagrama de Causa e Efeito; BDTD= Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações.

#### 4.2.2 Diagrama de causa e efeito (DCE)

O DCE é uma ferramenta visual utilizada para demonstrar a interdependência dos componentes em um sistema, incluindo relações causais diretas e indiretas (RYAN *et al.*, 2019). Estes diagramas são excelentes para capturar rapidamente hipóteses sobre as causas da dinâmica, elucidar e capturar os modelos mentais de indivíduos ou equipes e comunicar os *feedbacks* importantes que o usuário acredita serem responsáveis por um problema (STERMAN, 2000).

Seus principais constituintes são elementos básicos como palavras, frases, links e loops e, sua confecção, segue convenções especiais para nomear variáveis e descrever a polaridade dos links e loops (MORECROFT, 2015).

Os links entre as variáveis, descritos pelas setas, indicam a polaridade causal de uma variável em outra e carregam um sinal (+ ou -) (TEGEGNE *et al.*, 2016; YUAN *et al.*, 2017; YUAN, 2011).

O sinal positivo indica que uma determinada variável tem efeito diretamente proporcional em outra variável, enquanto o sinal negativo indica um efeito inversamente proporcional (YUAN, 2011).

Já os loops são fontes de estabilidade e resistência à mudança, ou seja, geram um comportamento de equilíbrio (PRUYT, 2013). Estes loops podem ser positivos ou negativos e são destacados por um identificador de loop que circula na mesma direção do ciclo e mostra um identificador “R” (loop de reforço) no caso positivo e “B” (loop de balanço) no caso negativo (STERMAN, 2000).

Ding *et al.* (2016) utilizaram o DCE para representar um subsistema de gerenciamento de redução de resíduos em dois estágios, no qual evidenciaram todas as variáveis-chave que afetam o gerenciamento de redução de resíduos de construção civil. Jia *et al.*, (2018) utilizaram para melhor evidenciar o sistema de gestão de resíduos de construção e demolição e a influência de variáveis que afetam este sistema. Xiao *et al.* (2020) utilizaram para exemplificar os impactos das políticas públicas na gestão de resíduos sólidos urbanos em Xangai, na China.

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DA PESQUISA

### 5.1 ETAPA 1 – PESQUISA SISTEMÁTICA DA LITERATURA

#### I. Pesquisa Bibliográfica

O primeiro passo foi a revisão sistematizada da literatura. A revisão, utilizando os termos do Quadro 2 e a combinação destes, serviu para evidenciar os tópicos mais citados e mais estudados na literatura selecionada com foco na descrição do setor siderúrgico, na definição de AEA, geração nos últimos anos, tipos de aplicações e foco nos usos com viabilidade técnica comprovada no Brasil e no mundo.

A revisão sistematizada foi utilizada para explorar as seguintes perguntas de pesquisa: “PP1: Quais são os elementos políticos, normativos, econômicos, físicos e operacionais relacionados ao aproveitamento do AEA em aplicações consolidadas?” “PP2: Qual o tipo de influência destes elementos no aproveitamento do AEA em aplicações consolidadas, de forma a fomentar sistemas de apoio à decisão?”

A revisão serviu para identificar os elementos influenciadores para o reaproveitamento de AEA, principalmente para aqueles casos com viabilidade técnica comprovada. Estes foram a base para a elaboração do DCE.

Para tanto, a revisão sistematizada da literatura considerou dados extraídos das plataformas portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), *Scopus (Elsevier)*, *Web of Science* (coleção principal), *Science Direct* e *Scielo*, considerando publicações seriadas de instituições ligadas ao setor siderúrgico e um lapso temporal de artigos publicados entre os anos de 2019 e 2022. Escolhido este período para abranger a literatura e os documentos mais recentes sobre o assunto estudado, identificando lacunas e estudos atuais mais relevantes. Também, como forma de expressar as opiniões identificadas, sem desconsiderar artigos ou documentos de anos anteriores, que fossem relevantes para este trabalho de pesquisa.

O foco nos países subdesenvolvidos, como a China, o Brasil e a Índia, se deve principalmente à questão de governança, com ambientes políticos instáveis, falta de diretrizes específicas para resíduos industriais, além de condições econômicas desafiadoras e infraestruturas envelhecidas. O que normalmente não ocorre em países e regiões desenvolvidas,

como Japão, Estados Unidos e União Europeia. Além da continentalidade da maioria dos países em desenvolvimento que possuem empresas siderúrgicas, com logística reversa difícil, dentre outras dificuldades enfrentadas para atendimento às suas necessidades e para a integração das populações habitantes da totalidade desses territórios.

Inicialmente, foram definidos diferentes termos de busca em conjunto com os operadores booleanos AND e OR, limitando os resultados da pesquisa apenas aos elementos que influenciam no aproveitamento de AEA e, em seguida, foram realizadas as pesquisas bibliográficas e documentais.

A definição dos critérios de triagem foi realizada a partir da leitura dos títulos dos artigos e identificação das temáticas de artigos que correspondiam ou não com as perguntas da pesquisa. A partir do portfólio bibliométrico exportado das bases de dados para planilha no *software* Excel foram obtidos 7.968 artigos das bases de dados, compondo o portfólio inicial.

Foram analisados inicialmente a aderência dos elementos das perguntas e utilizado o critério de inclusão utilizando os principais termos de busca, leitura dos títulos e dos resumos, também com a eliminação de duplicidades das bases de dados consultadas, obtendo-se 2.401 artigos com o uso do *Smart Bibliometrics* (PESSIN *et al.*, 2022).

Por fim, o critério de inclusão posterior foi a leitura completa de textos contidos nos artigos que mais correspondiam às perguntas da pesquisa, resultando em 58 artigos daquele portfólio inicial.

Aplicados os critérios de seleção, o portfólio bibliométrico final então foi organizado no *software* Mendeley possibilitando a classificação dos artigos pelos elementos que influenciam no aproveitamento do AEA. Como também, a utilização de filtros por ano, autor, revista e palavras-chave favorecendo uma leitura integral para coleta de dados secundários, análise de resultados, discussões e materialização das respostas às perguntas de pesquisa originais.

Como forma de sistematização da bibliografia selecionada foi elaborado um quadro resumo e um DCE com a relação existente entre estes elementos e o reaproveitamento de AEA, bem como apresentado uma discussão. A partir da análise preliminar do título, palavras-chave e resumo, os artigos foram selecionados de acordo com o escopo da pesquisa. Na etapa seguinte, foi feita uma análise crítica dos artigos com base nessas publicações.

## II. Pesquisa documental

A pesquisa documental contribuiu para descrever as gerações (números nos últimos anos) e os usos de AEA, para o qual o AEA encontra viabilidade técnica comprovada no Brasil e no mundo para ser usado em substituição a outros tipos de agregado. Apoiou na validação dos elementos influenciadores, baseado em relatórios, como exemplos, relatórios de empresas siderúrgicas, da *World Steel Association* (WSA) e do Instituto Aço Brasil (IABr).

Foram consultados bancos de dados públicos, publicações seriadas de instituições como a WSA, o IABr, a Associação Brasileira de Metalurgia (ABM), o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR), o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS-ES) (ESPÍRITO SANTO, 2019) e o GEO-OBRAS ES que é um *software* desenvolvido no Estado do Espírito Santo para gerenciar informações das obras executadas em todos os órgãos das esferas estadual e municipal, onde existem registros de alguns usos de AEA. Os termos de busca empregados na pesquisa documental foram descritos também no Quadro 2.

### 5.2 ETAPA 2 – DESCRIÇÃO DAS RELAÇÕES DE CAUSALIDADES ENTRE OS ELEMENTOS IDENTIFICADOS NA LITERATURA E O APROVEITAMENTO DO AEA

Com a coleta dos dados secundários foi possível identificar e correlacionar os elementos identificados na literatura que influenciam no aproveitamento do AEA, bem como no envio de AEA para aterro industrial. Para representação das interrelações entre os elementos identificados foi elaborado um diagrama de causa e efeito utilizando o *software* Vensim PLE® (VENTANA SYSTEMS, 2021).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### i. Pesquisa sistemática da literatura

A produção científica referente ao tema é relativamente extensa, quando se percebe que foram pré-selecionados 2.401 publicações de artigos relacionados a resíduos de forma geral e aplicações no período analisado (2019 a 2022). Com base nos filtros pré-definidos, selecionou-se um conjunto de 58 artigos que tinham foco principal em elementos políticos, normativos, econômicos, físicos, operacionais e aplicações para escórias siderúrgicas. A origem dos autores, em sua maioria, era de países em desenvolvimento como China, Índia e Brasil.

Observou-se nestes 58 artigos apenas menções aos elementos analisados, descritos em trechos dos resumos e introduções. Assim, observa-se o quanto este campo de análise ainda é inexplorado, especialmente em países em desenvolvimento que possuem plantas siderúrgicas.

A gestão de resíduos industriais não deve ser considerada como uma questão somente técnica, deve-se incluir no planejamento as questões sociais, econômicas, ambientais e políticas. A visão restrita da gestão integrada de resíduos de uma forma geral, normalmente resulta em planos focados apenas em questões técnicas, porém não realistas, ou seja, que independem das condições locais ou que são meras cópias de planos de gestão em outras indústrias localizadas na mesma região ou em outros municípios, estados ou países.

Produções científicas focadas em novas formas de aplicação para o AEA, como algumas citadas nesta dissertação, mesmo que apresentem bons resultados, não irão longe se as barreiras enfrentadas na prática não forem superadas junto ao público-alvo envolvido.

Dessa forma, a Etapa 1 resultou numa revisão bibliográfica com as potencialidades e desafios baseados em elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais que influenciam positivamente ou negativamente no aproveitamento de AEA em aplicações já consolidadas ou com viabilidade técnica comprovada, conforme apresentado no Quadro 3.

Ainda, é possível notar que as potencialidades e desafios, baseados nos elementos elencados como mais importantes, podem ser classificados nas dimensões propostas nesta pesquisa, de acordo com o seu caráter preponderante ou principal campo de atuação. Já Xu *et al.* (2019) classificaram em ambiental, técnico e econômico.

Quadro 2 - Potencialidades e desafios para o aproveitamento de AEA com base nos principais elementos políticos e normativos, econômicos, físicos e operacionais, identificados na literatura

<b>Elementos</b>	<b>Potencialidades</b>	<b>Referências</b>
Elementos políticos e normativos	Lei Tributária de Proteção Ambiental na China	Liu <i>et al.</i> (2022); Zhang <i>et al.</i> (2019)
	Lei se referindo a escória de ferro ou aço como um item de valor nos Estados Unidos	WISCONSIN ACT 285, Section 1m. 287.29, 2018
	Lei de promoção para aquisição de bens e serviços ecológicos no Japão	JAPÃO (2001), <i>Green Purchasing Law</i>
	Lei Fundamental do Ciclo de Vida dos Materiais no Japão	JAPÃO (2000), <i>Fundamental Law for Establishing a Sound Material-Cycle Society (Law N° 110, 2000)</i>
	Política Nacional do Aço na Índia	INDIA (2017), <i>Establishment Division, National Steel Policy</i> , 2017. Swathi <i>et al.</i> (2021)
	Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil	BRASIL (2010); Borges (2020)
	Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Espírito Santo (PERS-ES), no Brasil	BRASIL (2010); ESPÍRITO SANTO (2019); Chaves, Siman & Chang (2021)
	Diretiva do Parlamento Europeu sobre Resíduos de 2018	Diretiva Europeia 2018/851 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2008/98/CE
	Normas técnicas regulamentadoras no Brasil	ABNT NBR 10004 (2004a,2004b, 2004c); ABNT NBR 16364; DNIT/ES 406/2017; DNIT/ES 407/2017
	Lei quanto a “Selo de Sustentabilidade Tesouro Verde”	BRASIL, 2018
	Declaração ambiental, protocolo de qualidade, selo verde, rótulo ecológico, sistema de avaliação ambiental de reciclagem e certificação ambiental para resíduos e coprodutos	Lee <i>et al.</i> (2021); LI <i>et al.</i> (2020); Sarkar <i>et al.</i> (2015); Minkov <i>et al.</i> (2015). <i>Quality Protocol</i> , REINO UNIDO (2016)
	Plano Diretor Resíduo Zero	SINGAPURA (2023), <i>Zero Waste Masterplan</i>
	Incentivo legal para processos com menores emissões de carbono	Hossain & Sohail (2019); Freitas <i>et al.</i> (2018)
Imposição legal de sobretaxas para mineração de matérias-primas virgens e para aterros industriais de resíduos industriais	Mhatre, Gedam & Unnikrishnan (2021)	
Elementos econômicos	Subsídios econômicos e isenção de taxas para o reaproveitamento de escória como AS	Guo, Bao & Wang (2018); Filippo <i>et al.</i> (2019); Liu <i>et al.</i> (2022); Machado <i>et al.</i> (2020); Oliveira <i>et al.</i> (2020); Kang <i>et al.</i> (2018); Ajayi & Oyedele (2017); Ghaffar, Burman & Braimah (2020)
	Iniciativas econômicas próprias das empresas e políticas econômicas integradas com municípios	
	Ganhos econômicos com a revenda de escória e de AS a partir das escórias de aciaria	
Elementos físicos	Simbiose industrial	Di Maria <i>et al.</i> (2018)
	Crescimento na construção de rodovias	Goli (2022); Swathi <i>et al.</i> (2021)
<b>Elementos</b>	<b>Desafios</b>	<b>Referências</b>
Elementos políticos e normativos	Leis e outros atos normativos com restrição do uso de AEA em algumas aplicações na China	Dondi <i>et al.</i> (2021); Lee <i>et al.</i> (2021); Ghosh <i>et al.</i> (2019); Guo <i>et al.</i> (2018)
	Inexistência de diretrizes internacionais padronizadas para normatização da qualidade das escórias como AS	
	Controle fiscal	Ajayi <i>et al.</i> (2017)
Elementos econômicos	Incentivo a redução da compra de matérias virgens e do consumo de AN	Guo, Bao & Wang (2018); Filippo <i>et al.</i> (2019); Liu <i>et al.</i> (2022); Machado <i>et al.</i> (2020); Oliveira <i>et al.</i> (2020); Kang <i>et al.</i> (2018); Ajayi & Oyedele (2017); Ghaffar, Burman & Braimah (2020)
	Custos Logísticos	Swathi <i>et al.</i> (2021); Sellitto <i>et al.</i> (2019)

	Preço do AN	Ajayi & Oyedele (2017); Ghaffar, Burman & Braimah (2020)
Elementos físicos	Esgotamento de recursos de AN	Goli (2022); Swathi <i>et al.</i> (2021)
Elementos operacionais (de monitoramento e controle)	Parâmetros de controle	Dai <i>et al.</i> (2022); Fu <i>et al.</i> (2022); De Mendonça <i>et al.</i> (2016)
	Disponibilidade de dados confiáveis	Perteghella <i>et al.</i> (2022)

Legenda: AN= agregado natural; AS= agregado siderúrgico; ABNT= Associação Brasileira de Normas Técnicas; DNIT = Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Fonte: Autoria própria.

Os elementos elencados no Quadro 3, relacionados às potencialidades e desafios para o aproveitamento do AEA, serão detalhados a seguir.

## ii. Elementos Políticos e Normativos

As políticas públicas podem ser definidas como um sistema de leis, medidas regulatórias, cursos de ação e prioridades de financiamento, coadunadas com o intuito de solucionar um problema comum (ANDERSSON, 2020). As estratégias para reduzir a geração de AS e aumentar seu reaproveitamento devem ser incentivadas no gerenciamento integrado dos resíduos industriais (LLATAS *et al.*, 2021).

O governo da China, por exemplo, introduziu muitas políticas envolvendo investimento e redução de impostos, como o 12º Programa Quinquenal de Planejamento e Implementação para Utilização Abrangente de Resíduos Sólidos. Além disso, 32 padrões adicionais para a produção de escória de aço foram criados, incluindo aqueles que tratam de escória de aço para estradas, cimento e uso interno. Essas leis, incentivos, regulamentos, políticas e padrões forneceram com sucesso incentivos ou restrições legais rígidas, orientação industrial oportuna e suporte de políticas para a utilização e gestão de agregados siderúrgicos, como as escórias de aço (GUO *et al.*, 2018).

Diversos estudos demonstraram o papel crucial dos atos políticos e normativos, como principalmente leis e regulamentações para aprimorar a gestão e o gerenciamento de AEA em seus territórios.

As leis e regulamentos possuem o objetivo de propor requisitos compulsórios para a promoção da reciclagem, como a de AEA, além de descreverem elementos de comando-controle para ações contrárias (LI *et al.*, 2020). Ajayi e Oyedele (2017) afirmam que a legislação e o controle fiscal são estratégias eficazes para conduzir às práticas sustentáveis, incluindo a mitigação da geração crescente de resíduos industriais.

As regulamentações podem atuar como estímulo para a instalação de novas infraestruturas, para apoiar a reciclagem de resíduos e incentivar a demanda por produtos reciclados (CALVO; VARELA-CANDAMIO; NOVO-CORTI, 2014). Para o sucesso da reciclagem dos AEA, as políticas públicas precisam estar de acordo com o princípio da economia circular, que visa as reduções do consumo de recursos naturais e desperdícios, bem como o reaproveitamento de resíduos (OLIVEIRA, 2020).

Embora leis e regulamentos estejam sendo estabelecidos em muitos países que possuem indústrias siderúrgicas, ainda persistem barreiras na prática para sua implementação, e a escala de reciclagem da AEA permanece baixa, por exemplo, em países como a China (GUO *et al.*, 2018). Nesse sentido, com intuito de valorizar o aproveitamento da AEA, o Estado de Wisconsin nos EUA publicou a Lei 285 de 16 de abril de 2018 mudando a classificação das escórias da produção de ferro e aço, passando a ter a seguinte redação:

*“A classificação da escória da produção de ferro e aço foi alterada, desde que seja gerenciada como um item valioso e de forma controlada, para uso como produto e não resíduo para descarte. Nessa condição, essas escórias não são mais consideradas resíduos sólidos, mas como escória gerada pela produção ou processamento de ferro ou aço que é gerenciada como um item de valor de forma controlada e não é descartada (traduzido de WISCONSIN ACT 285, Section 1m. 287.29, 2018)”.*

Percebendo essa necessidade, a Diretiva Europeia 2008, que trata de resíduos, já havia incluído o termo “coproduto”, a fim de facilitar o entendimento e possibilitar a ampliação do reaproveitamento de resíduos de processos industriais. Nesta Diretiva, uma substância ou objeto resultante de um processo de produção, cujo objetivo principal não é a produção deste item, pode ser considerado como não sendo um resíduo referido no parágrafo primeiro do artigo 3º, mas como coproduto desde que atenda condições específicas (*Directive 2008/98/CE of The European Parliament and Of the Council, Nov. 19, 2008*).

A Diretiva Europeia 2018/851, que altera a Diretiva 2008/98/CE, considera também no item dezesseis (16) que para promover a utilização sustentável dos recursos e a simbiose industrial, os Estados-Membros deverão tomar medidas adequadas para facilitar a classificação como subprodutos das substâncias ou objetos resultantes de um processo de produção cujo objetivo principal não seja a produção dessas substâncias ou objetos, se forem respeitadas as condições harmonizadas estabelecidas a nível da União (*Directive 2018/851 of The European Parliament and Of the Council, May 30, 2018*).

Além disso, a Diretiva Europeia 2018/851 considera, como exemplo, o seguinte: item (2) Melhorar a eficiência da utilização dos recursos e garantir que os resíduos sejam reconhecidos como recursos contribuindo para reduzir a dependência da importação de matérias-primas e facilitar a transição para uma gestão dos materiais mais sustentável e para um modelo de economia circular; e item (12) Introduzir uma definição de valorização material que inclui a preparação para a reutilização, a reciclagem e o enchimento, bem como outras formas de valorização material como o reprocessamento de resíduos em matérias-primas secundárias para fins de engenharia em construção de estradas ou outras infraestruturas (*Directive 2018/851 of The European Parliament and Of the Council, May 30, 2018*).

No Japão, muitos produtos gerados a partir dos AS da produção de ferro e aço foram avaliados por seu desempenho ambiental, sendo incluídos como "itens de aquisição designados" em obras públicas de acordo com a Lei de Promoção para Aquisição de Bens e Serviços Ecológicos pelo Estado e outras entidades japonesas, como a Lei de Compras Verdes, que entrou em vigor em 2001 (JAPÃO, 2001).

No Japão também se tem a Lei Fundamental do Ciclo de Vida dos Materiais (JAPÃO, 2000), cujo objetivo é facilitar as políticas de transformação em uma sociedade de ciclo dos materiais sólida, de forma abrangente e sistemática e, assim, contribuir para garantir uma vida saudável e culta para o presente e o futuro das gerações.

A Política Indiana do Aço é um outro exemplo, que tem o intuito de promover o crescimento e desenvolvimento sustentável mais rápido da indústria siderúrgica no país (SWATHI *et al.*, 2021).

Na Inglaterra, os AEA receberam um protocolo de qualidade (REINO UNIDO, 2016), passando a ser considerados totalmente recuperáveis e não mais sujeitos aos controles como resíduos sólidos. Para tanto, esses agregados precisam atender à determinadas condições, como por exemplo: sejam utilizados apenas os materiais previstos e produzidos a partir dos materiais autorizados; atendam às especificações técnicas de qualidade ambiental europeias; tenham um manual de controle de produção, dentre outras condições.

Por outro lado, há também a inserção de planos resíduo zero, implementados com o objetivo de propor linhas de ações estruturantes e não estruturantes, referentes ao manejo de resíduos sólidos, bem como apresentar prioridades. Como exemplo, o Plano Diretor Resíduo Zero de Singapura, que engloba as aspirações da população e incorpora as ações de todas as

partes envolvidas (indivíduos, empresas, sociedade civil e o governo) na busca por soluções inovadoras que poderão ajudar no enfrentamento de desafios globais (SINGAPURA, 2023).

No Brasil, a valorização do reaproveitamento de resíduos sólidos municipais e industriais está expressa na Lei Federal 12.305, de 2 de agosto de 2010. Esta lei instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e estabelece uma ordem de prioridade (não geração, redução, reaproveitamento, reciclagem, tratamento e destinação final ambientalmente adequada), além de estabelecer o PGRS como ferramenta de gestão de resíduos (BRASIL, 2010).

Assim, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Espírito Santo (PERS-ES) no Brasil é um exemplo que apresentou estratégias de gestão focados não só na proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, como também para a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e não geração de resíduos sólidos, além da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. O PERS-ES também sugeriu o estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços e incentivo à indústria da reciclagem (ESPÍRITO SANTO, 2019; CHAVES *et al.*, 2021).

Na União Europeia, a elaboração de PGRS já é uma prática exigida, sendo considerada uma das “Melhores Práticas de Gestão Ambiental” na área de gestão de resíduos (GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018).

Incentivo legal para processos com menores emissões de carbono também são bons exemplos (HOSSAIN *et al.*, 2019; FREITAS *et al.*, 2018). Assim como a imposição legal de sobretaxas para mineração de matérias-primas virgens e para aterros industriais de resíduos industriais (MHATRE *et al.*, 2021).

Em 2017, o governo da Índia (GoI) elaborou a Política Nacional do Aço com o objetivo de aumentar a taxa de produção de aço para 300 Mt por ano até 2030-31, aumentando assim a geração de escória (SWATHI *et al.*, 2021). Para gerenciar os subprodutos do aço, como a escória de aço, o GoI está incentivando a indústria siderúrgica na Índia a estruturar um novo PGRS para um impulso adicional na reciclagem de seus resíduos (SWATHI *et al.*, 2021).

No Brasil, a ABNT publicou, em 31 de maio de 2004 a norma técnica para a classificação de resíduos sólidos e, baseado nos critérios desta Norma, ensaios laboratoriais têm classificado a escória de aciaria como resíduo não perigoso e inerte (ABNT NBR 10004, 2004).

Para emprego dos agregados (naturais ou siderúrgicos) na construção civil no Brasil, devem ser observadas as ABNT NBR NM 52:2003, ABNT NBR NM 53:2003 e ABNT NBR 7211:2005. Em maio de 2015 foi promulgada a Norma Brasileira para a Pavimentação Rodoviária (ABNT NBR 16364, 2015) e em fevereiro de 2017 foram criadas duas especificações técnicas para pavimentação rodoviária pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), DNIT 406/2017 e DNIT 407/2017 – ES.

Estas recentes normas publicadas no Brasil foram um avanço para o país e reforçam a viabilidade técnica já comprovada, todavia, são apenas orientações a serem seguidas, que não possuem caráter de cumprimento obrigatório e nem são reconhecidas na forma de lei (BORGES, 2020).

Outros elementos políticos e normativos analisam a contribuição e o desempenho no aproveitamento do AEA em relação aos desafios ambientais. Estes são elementos mais subjetivos, visto que o impacto do homem nos ecossistemas gera problemas, como desmatamento, poluição, escassez de recursos, perda de habitat para os animais, extinção de espécies e geração de resíduos poluidores e contaminantes.

Os principais elementos políticos e normativos com vieses ambientais citados na literatura possuem similaridades (protocolos, selos verdes, rótulos ecológicos, certificações e declarações ambientais) e servem para identificar especialmente as semelhanças e as desigualdades no que tange a qualidade ambiental para os diferentes usos, sendo importantes para se apresentar possíveis impactos ambientais e as formas de evitá-los ou identificar vulnerabilidades ambientais entre diferentes aplicações.

Declaração ambiental, selos verdes, rótulos ecológicos e certificação ambiental para coprodutos são uma garantia adicional de que o produto/coproduto/serviço apresenta menor impacto ambiental do que seu similar. Exemplo que se pode citar, devido ao crescimento constante do número de programas ambientais existentes nos últimos anos, tem sido as declarações ambientais do tipo III (mais conhecidas como Declarações Ambientais de Produtos - DAP) que fornecem informações ambientais quantificadas e verificadas de forma independente sobre o ciclo de vida de bens ou serviços (MINKOV *et al.*, 2015).

As DAP devem permitir a comparação entre produtos (o que envolve também os agregados alternativos e os AN), cumprindo a mesma função e seu desenvolvimento e uso é um ato voluntário. Os rótulos, protocolos, certificações e selos verdes ambientais em geral também

podem ser usados para aumentar os *feedbacks* positivos do mercado, fornecendo informações ambientais transparentes por meio da análise do ciclo de vida de cada produto (MINKOV *et al.*, 2015).

Para Ghosh *et al.* (2019), a ausência de diretrizes ambientais padronizadas ao nível mundial torna inexplorado o potencial das oportunidades de aproveitamento pleno dos resíduos siderúrgicos e é algo que demanda a atenção da indústria e dos pesquisadores.

Para Lee *et al.* (2021) há uma necessidade urgente de criar e implementar sistemas de avaliação ambiental de reciclagem para a reciclagem segura de produtos residuais, normas ambientais relativas às escórias siderúrgicas que podem ser recicladas como produto, assim como declarações, rótulos, certificados, protocolos e selos ambientais para coprodutos. Também descreve que normas devem ser alteradas e/ou estimuladas, a fim de acompanhar as mudanças implementadas pelas próprias normas.

Os protocolos ambientais empregados na gestão de resíduos sólidos da indústria siderúrgica são desenvolvidos não apenas para a utilização lucrativa destes resíduos na fabricação de produtos convencionais, mas também para a conversão destes em produtos totalmente novos (SARKAR *et al.*, 2015).

Dentre as barreiras apontadas, Minkov *et al.* (2015) citam a existência de métodos “semelhantes, mas diferentes” para calcular os impactos ambientais que estão introduzindo recentemente uma confusão adicional entre os consumidores e formuladores de políticas públicas, podendo gerar desconfiança nas alegações “verdes”.

Por outro lado, há também oportunidades, como a harmonização das regras e instruções que muitos dos esquemas enfrentarão. Estas iniciativas de harmonização estão se tornando amplamente reconhecidas para aumentar a importância e a comparabilidade destes critérios ambientais em escala global (MINKOV *et al.*, 2015).

Finalmente há a questão dos aterros de diferentes tipos como forma de disposição final de rejeitos mais disseminada no mundo, o que não seria diferente para a AEA. Entretanto, devido à oferta restrita de espaço, o emprego dessa tecnologia torna-se limitada (RATNAWATI *et al.*, 2023).

De todas as formas, o aterro continua a desempenhar um papel fundamental no fechamento do ciclo de materiais residuais da economia circular (rejeitos), contando com etapas de pré-tratamentos e tratamentos *in situ* para estabilizar os resíduos e imobilizar os contaminantes, alcançando a qualidade final de armazenamento (LUO *et al.*, 2022).

Embora a prevenção de resíduos deva ser a ação mais preferencial, o foco dos atos políticos e normativos e outras ações a nível mundial, nos últimos anos, tem sido o reuso e a reciclagem dos resíduos, com metas cada vez mais ambiciosas. Consequentemente, a reciclagem é muitas vezes percebida como uma ferramenta fundamental para atingir a meta de resíduo zero, enquanto o aterro e outras atividades de descarte são percebidas como obsoletas e perigosas (LUO *et al.*, 2022).

### **iii. Elementos Econômicos**

Em adição aos elementos políticos e normativos, o uso de elementos econômicos como subsídios e cobrança de taxas/tarifas e desoneração de impostos têm demonstrado ser uma abordagem eficaz na criação de oportunidades para a redução, reciclagem e/ou reutilização de AEA, favorecendo o aproveitamento.

A melhoria da taxa de utilização do agregado de escória de aço pode se beneficiar dos esforços dedicados na área da economia, com o oferecimento de novos incentivos financeiros ou de receita tributária para empresas que fazem o beneficiamento da escória. Esses incentivos devem estimular a aplicação de AEA para a construção de estradas e aplicações na agricultura (GUO *et al.*, 2018).

Adicionalmente, elementos econômicos como subsídios e a desoneração fiscal sobre o agregado siderúrgico de escória de aciaria se apresenta como uma outra ferramenta que visa tornar sua reciclagem comercialmente mais atrativa. Uma das técnicas consiste no aumento do preço das matérias-primas virgens como, por exemplo, cascalho, areia e rocha por meio de impostos com o intuito de incentivar o uso do agregado reciclado (AJAYI *et al.*, 2017; GHAFAR *et al.*, 2020).

Para Gálvez-Martos *et al.* (2018), é possível alcançar taxas próximas de 100% de reciclagem de resíduos de agregado, desde que sejam rompidas as barreiras existentes na sua comercialização, do mercado de materiais virgens e de sua logística. De acordo com Filippo *et al.* (2019), os incentivos econômicos podem ser aplicados na forma de incentivos fiscais,

assistência a empréstimos e abatimentos ou concessões. Pensar os instrumentos financeiros de ressarcimento faz-se fundamental para garantir a viabilidade econômica e financeira na gestão de resíduos (DUTRA *et al.*, 2020).

Comprovar a viabilidade financeira dos empreendimentos é pré-requisito para justificar investimentos públicos e privados em qualquer projeto, sem tal viabilidade não haverá investimento (HM TREASURY, 2018).

Instrumentos de desoneração fiscal trazem viabilidade para empreendimentos que não poderiam se sustentar sem incentivos econômicos e fiscais. Por exemplo, na China, um estudo dos subsídios concedidos pelo governo na área da reciclagem de resíduos da construção revela benefícios econômicos revertidos às empresas, com efeitos na promoção do desenvolvimento da indústria de reciclagem de resíduos, comprovando assim um efeito positivo na sustentabilidade financeira desses empreendimentos e do setor como um todo (LIU *et al.*, 2022).

Normalmente, as indústrias reagem facilmente a abordagens financeiras, como fornecimento de subsídios e desoneração fiscal, para atingir ou mesmo superar as metas na gestão dos seus resíduos sólidos (ASLAM; HUANG; CUI, 2020).

O governo japonês, por exemplo, oferece subsídios através de incentivos fiscais, créditos financeiros e empréstimos bonificados para empresas que reciclam agregados reciclados, com empréstimos a juros baixos para consumidores que compram produtos reciclados (HO, 2013; LI, 2018). Em Cingapura, o governo aluga para empresas de reciclagem a uma taxa de aluguel baixa um parque industrial de reciclagem que construiu especificamente para este caso (HO, 2013; LI, 2018).

O estado do Amapá, no Brasil, a partir da Lei Estadual nº 2.353 de 2018, regulamentada pelo Decreto Estadual nº 2.894 de 2018, passou a disponibilizar uma série de incentivos públicos para que as atividades econômicas que conservam florestas nativas ingressem na economia verde do Estado. O “Selo Sustentabilidade Tesouro Verde” é a credencial reconhecida pelo Estado que atesta que a empresa cumpriu a “cota de retribuição socioambiental” do ano, adquirindo “crédito de reposição florestal”, que é a compensação do volume de matéria-prima extraída de vegetação natural pelo volume de matéria-prima resultante de plantio florestal efetivo de espécies florestais adequadas para geração de estoque ou recuperação de cobertura florestal.

Outro exemplo foi a implementação de uma nova Lei Tributária de Proteção Ambiental em janeiro de 2018 na China, que deu, por exemplo, aos fabricantes de aço menos poluidores um incentivo adicional para aumentar a utilização de AEA (LIU *et al.*, 2022).

Para Liu *et al.* (2022), com base nos estudos recentes realizados após a implantação desta lei tributária chinesa, os subsídios governamentais podem ter um efeito inibitório sobre o investimento ambiental, e essa relação é mais significativa para os grandes poluidores. Alguns estudiosos acreditam que o efeito inibitório sobre o investimento ambiental tem um efeito de exclusão de outras decisões operacionais e aumenta os riscos financeiros das empresas.

Além disso, devido à falta de orientação de investimento e vulnerabilidades na governança corporativa, relações políticas, restrições políticas e outros fatores, algumas empresas localizadas na China e em outros países fizeram investimentos ambientais excessivos (LIU *et al.*, 2022). Estes pesquisadores descobriram que o imposto ambiental tem um efeito positivo no desempenho operacional e de mercado das empresas.

Existem elementos econômicos que trazem benefícios e outros que podem refletir em aumento de gastos, como cobrança de taxas/tarifas e impostos. Tendo em conta que tal elemento tem se tornado o principal meio de incentivo ambiental em vários países, é particularmente importante estudar os efeitos desses na redução da poluição e, além de possibilitar a construção de um sistema tributário ambiental racional (LI *et al.*, 2022).

Para Li *et al.* (2021), com base em estudos realizados na China, a política fiscal ambiental reduz a emissão de poluentes das usinas, mas existe uma relação em forma de “U” invertido entre a redução de poluentes e as taxas de impostos, além dos impostos ambientais desempenharem um papel limitado em regiões de alta regulamentação ambiental e estes impostos ambientais terem poucos efeitos sobre as grandes empresas que são estatais.

O aumento do preço das matérias-primas naturais como cascalho, areia e rocha por meio de impostos tem o intuito de incentivar o uso do agregado reciclado (AJAYI; OYEDELE, 2017; GHAFAR; BURMAN; BRAIMAH, 2020).

A aplicação de sobretaxas sobre a destinação para aterros e sobre a oneração do uso de AN são utilizados em diversos países para incentivar a utilização de agregados reciclados (CADORET; GALLI; PADOVANO, 2020; ZHU *et al.*, 2019).

Impactos ambientais adversos também são causados pelo descarte irregular de resíduos, afetando diretamente o esgotamento dos recursos naturais (KAMALI; HEWAGE; SADIQ, 2019; LLATAS *et al.*, 2021), o impacto sobre as mudanças climáticas (KAMALI; HEWAGE; SADIQ, 2019; WANG *et al.*, 2019; XIA; DING; XIAO, 2020), danos ambientais irreversíveis no solo e na água (LI *et al.*, 2020; POVETKIN; ISAAC, 2020), a questão sanitária urbana (LI *et al.*, 2020), além da poluição do ar (DUAN *et al.*, 2019; KONG; MA, 2020) e da poluição visual (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Países como Dinamarca e Suécia são exemplos que, desde 2011, conseguiram promover o uso de agregados reciclados e incentivaram a taxa de reciclagem e o aproveitamento com a aplicação dos impostos sobre os AN (SÖDERHOLM, 2011).

A melhoria da taxa de utilização da escória de aço pode se beneficiar de esforços dedicados na área de economia, com o oferecimento de novos incentivos financeiros ou de receita tributária para empresas menores que fazem o beneficiamento de escória. Esses incentivos devem estimular a aplicação de escória para construção de estradas e aplicações na agricultura (GUO *et al.*, 2018).

Na investigação, Fan *et al.* (2019) enfatizou a necessidade de uma transição de uma economia linear para uma economia circular por meio da gestão sustentável de resíduos.

Walmsley *et al.* (2019) analisaram e verificaram fortes evidências de que a economia circular vem ganhando impulso e se tornando um tema altamente estudado que molda os instrumentos legais na Europa, China e Sudeste Asiático, EUA e cada vez mais em todo o mundo.

No entanto, a viabilidade econômica tem sido um ponto forte a ser considerado, pois haveria uma pequena chance de aceitação mundial se a economia circular fosse mais cara do que a economia linear. Até agora, muitos estados têm apoiado a economia circular por meio de políticas de tributação, desoneração fiscal e subsídios (SADENOVA *et al.*, 2019).

A indústria siderúrgica brasileira pode ser considerada aderente a economia circular, uma vez que o Instituto Aço Brasil formalizou em 2017 a sua participação na Circular Economy 100 Brasil (CE100 Brasil), através do programa oficial de Ellen MacArthur no país (MACHADO *et al.*, 2020).

De acordo com Machado *et al.* (2020), o CE 100 Brasil é um programa concebido especialmente para organizações que tenham identificado oportunidades econômicas no mercado brasileiro. É um programa de colaboração pré-competitiva e de inovação que reúne partes interessadas chave de empresas, governos, da academia e de organizações afiliadas para atuarem como um laboratório vivo, para a transição rumo à economia circular no Brasil.

No que tange aos custos com a questão logística, devido ao alto teor de óxido ferroso e baixo teor de sílica no AEA em comparação com os AN, a densidade específica dos AEA é 25 a 35% maior em comparação com os AN típicos e isso acarreta custos de transporte de AEA mais altos do que o custo de transporte da mesma quantidade de AN (SWATHI *et al.*, 2021), influenciando negativamente tanto no aproveitamento quanto no envio para aterro industrial.

Entretanto, a maior densidade também reflete em menores volumes de mistura de pavimentação (SWATHI *et al.*, 2021). No entanto, os benefícios ambientais, como a redução de emissões que de outra forma ocorreriam devido à extração, britagem e peneiramento de AN, se considerados, superam esses custos adicionais na maioria das vezes se outras questões relacionadas ao *mix* e ao desempenho forem abordadas (SWATHI, *et al.*, 2021).

A simbiose ocorre quando as empresas ou empresas e governos se unem para formar uma rede colaborativa para sustentabilidade e desperdício zero, ou seja, quando o resíduo de um se torna matéria-prima ou insumo em outro. Como exemplo, apesar do sucesso da implementação da simbiose entre as indústrias siderúrgica e cimenteira, por meio do uso da escória granulada de alto forno em substituição ao clínquer, o potencial de valorização de outros resíduos da produção de aço não é totalmente explorado atualmente (DI MARIA *et al.*, 2018).

#### **iv. Elementos físicos e operacionais**

Os elementos físicos e operacionais foram os menos citados na literatura pesquisada. No entanto, são de suma importância.

Em relação aos elementos físicos, o mais citado na literatura foi o esgotamento de recursos de AN (GOLI, 2022; SWATHI *et al.*, 2021), favorecendo e alertando para o uso do AEA e outros agregados alternativos.

Quanto aos elementos operacionais, os citados foram parâmetros de controle (DAI *et al.*, 2022; FU *et al.*, 2022; DE MENDONÇA *et al.*, 2016) e a disponibilidade de dados confiáveis

(Perteghella *et al.*, 2022). As partes interessadas e o controle fiscal devem estar atentos aos parâmetros de controle e à disponibilidade de dados confiáveis das empresas geradoras de AEA para os usos com aplicações consolidadas, especialmente no que tange ao potencial expansivo da escória de aciaria (De Mendonça *et al.*, 2022), por ser um fator limitante na reutilização direta sem beneficiamento adequado.

**v. Descrição das relações de causalidades entre os elementos identificados na literatura e o aproveitamento do AEA**

Na literatura selecionada, os AEA podem ser uma opção para substituir recursos naturais (areia, gnaisse, minerais argilosos) e outros subprodutos industriais com rotas de reciclagem já estabelecidas (NUNES *et al.*, 2021).

Esforços significativos estão sendo realizados pelas empresas siderúrgicas para maximizar o uso dessa escória como agregado em aplicações de engenharia civil. A título de exemplo, de 2016 a 2019, a construção de rodovias na Índia aumentou a uma taxa anual de mais de 20%, e somente no período 2019-2020, quase 10.000 km de rodovias foram construídos (SWATHI *et al.*, 2021).

Esse crescimento, juntamente com a proibição de exploração AN em pedreiras em alguns estados da Índia criou uma grave escassez por esse material. No entanto, também criou uma oportunidade de se usar agregados alternativos na construção de rodovias, como foi o caso do AEA (SWATHI *et al.*, 2021).

Se considerado o aspecto técnico como viabilizador de alguns usos para a construção civil, os elementos políticos e normativos, físicos e operacionais, além daquelas econômicas que propiciam a sustentabilidade das usinas de beneficiamento, tornam-se fatores decisivos para viabilizar o fomento do reuso e da reciclagem dos resíduos siderúrgicos.

A reciclagem tem vários limites, entre os quais, a produção de resíduos finos inevitáveis nos quais os contaminantes se acumularam e precisam encontrar uma destinação final segura. Dessa forma, os AEA que possuem aplicações consolidadas devem receber fomentos através de atos políticos e normativos que favoreçam o maior aproveitamento, explicitado no DCE, visto que grandes quantidades ainda estão sendo destinadas a aterros industriais, mesmo que sustentáveis.

Embora as legislações vigentes sejam adotadas mundialmente para impulsionar a reciclagem de resíduos sólidos (LI *et al.*, 2020), a compreensão das barreiras que impactam o aproveitamento dos AEA pode impulsionar a reciclagem destes resíduos sólidos em contextos urbanos distintos (CONKE, 2018).

Há também elementos econômicos que influenciam no aproveitamento de AEA de forma indireta, conforme apresentado no DCE, alinhado com uma mudança da economia linear para a economia circular tornando o agregado reciclado comercialmente mais atrativo.

Dessa forma, a avaliação, por exemplo, de elementos políticos, normativos, econômicos e ambientais são comumente empregadas para avaliar práticas sustentáveis e impulsionar o reuso e a reciclagem de resíduos (AJAYI *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020).

A partir dessa pesquisa, verificou-se que os elementos políticos e normativos foram os que apresentaram maior frequência de publicações, dentre os artigos selecionados, no que tange ao fomento do uso de AEA, sendo verificada presença significativa em 58% dos artigos, seguido dos elementos econômicos (24%), dos elementos operacionais, ou seja, de monitoramento e controle (13%), e finalmente daqueles elementos físicos (5%).

A partir da sistematização das referências pesquisadas, reunidas por elementos de gestão, foi possível propor um DCE para ilustrar as relações de causalidade entre esses elementos e as variáveis de interesse. É esperado que a pesquisa se fundamente em publicações atuais e relevantes que abranjam estudos relacionados a instrumentos legais, ambientais e econômicos e o uso de escória de aciaria, seguindo a mesma linha de pesquisa de Siman *et al.* (2021), Yamane *et al.* (2021) e Santos *et al.* (2022).

No DCE, na cor preta e em negrito, estão as variáveis de interesse (geração, estoque, aproveitamento e aterro de AEA). Os elementos políticos e normativos, identificados na literatura e foco desta pesquisa, estão representados pela cor cinza claro. Em marrom os elementos econômicos, em azul os elementos físicos e em verde os elementos operacionais.

Em lilás está um grupo de elementos encontrado na literatura que, apesar de não serem foco desta pesquisa, também influenciam no aproveitamento do AEA. São elementos que afetam ou são afetados de alguma forma pela geração do AEA, ou seja, as partes interessadas representadas, por exemplo, por instituições, investidores, grupos, pessoas, empresas etc.



aproveitamento do AEA (PERTEGHELLA *et al.*, 2022), consequentemente influenciam direta e positivamente no controle fiscal.

Quanto à influência no aproveitamento do AEA pelos elementos físicos encontrados na literatura tem-se: a simbiose industrial, quando um resíduo de um se torna matéria-prima ou insumo para outro (DI MARIA *et al.*, 2018), possui influência direta e positiva, assim como o esgotamento dos recursos de AN e o crescimento da demanda por rodovias que influenciam direta e positivamente no aproveitamento (GOLI, 2022; SWATHI *et al.*, 2021).

Os elementos econômicos, como subsídios econômicos e isenção de taxas para o reaproveitamento de AEA, iniciativas econômicas próprias das empresas e políticas econômicas integradas com municípios, ganhos econômicos com a revenda de AEA, incentivo a redução da compra de matérias virgens e do consumo de AN (GUO *et al.*, 2018; FILIPPO *et al.* 2019; LIU *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.* 2020; MACHADO *et al.*, 2020; KANG *et al.*, 2018; AJAYI *et al.*, 2017; GHAFAR *et al.*, 2020) influenciam positivamente no aproveitamento do AEA, bem como o maior preço do AN influi positivamente no aproveitamento do AEA (AJAYI *et al.*, 2017; GHAFAR *et al.*, 2020).

Os custos logísticos excessivos, apesar de serem elementos econômicos, estão apresentados separadamente visto que influenciam negativamente tanto no aproveitamento quanto no envio para aterro industrial (SWATHI *et al.*, 2021; SELLITTO *et al.*, 2019), o que pode acarretar um maior estoque interno nas empresas.

Quanto aos elementos operacionais (de monitoramento e controle) tem-se: parâmetros de controle, como os de qualidade do AEA (DAI *et al.*, 2022; FU *et al.*, 2022; DE MENDONÇA *et al.*, 2016), se estiverem fora de limites legais para aplicação podem influenciar negativamente na geração e positivamente no envio para aterro industrial; e a disponibilidade de dados confiáveis que influenciam positivamente no aproveitamento (PERTEGHELLA *et al.*, 2022), caso contrário influenciam no envio para aterro industrial.

O DCE possui quatro (4) ciclos, três (3) ciclos negativos (balanceamento) e um (1) ciclo positivo (reforço). A Figura 4 apresenta a relação entre estes ciclos.

O ciclo 1 de balanço é representado pela relação entre a variável geração de AEA e os elementos partes interessadas e controle fiscal. Se aumenta a geração, aumenta a demanda pelas partes interessadas, como especialmente pelos clientes de AEA. Consequentemente pode

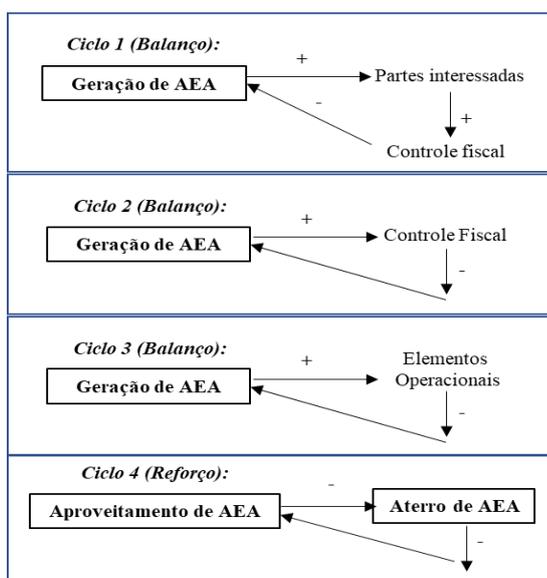
aumentar a demanda por outras partes interessadas como instituições, investidores, grupos, pessoas etc. Que por sua vez aumenta o controle fiscal, podendo reduzir a geração.

O ciclo 2 de balanço é representado pela relação direta entre a variável geração de AEA e o controle fiscal. Se aumenta a geração de resíduos com o aumento da produção de aço, aumenta a demanda por um maior controle fiscal que por sua vez pode reduzir a geração.

O ciclo 3 de balanço é representado pela relação direta entre a variável geração de AEA e os elementos operacionais (de monitoramento e controle). Se aumenta a geração, aumenta a demanda por um maior controle dos elementos operacionais que por sua vez podem reduzir a geração.

O ciclo 4 de reforço é representado pela relação entre as variáveis aproveitamento e aterro, se aumenta o aproveitamento reduz-se o envio para aterro e vice-versa.

Figura 4 - Quatro ciclos de *feedback* do DCE



Fonte: Os Autores (2023)

As influências negativas identificadas no Quadro 3 e no DCE, como atos políticos e normativos restringindo o uso de AEA em obras estruturais e não estruturais com aplicações consolidadas ou mesmo a ausência de leis incentivando o uso, são um custo de oportunidade, ou seja, inviabilizam uma vantagem competitiva econômica, ambiental e técnica, da qual um AN concorrente pode se apoderar.

Estas barreiras legais causam o impedimento e insegurança jurídica para a realização de atividades sustentáveis, além de impactarem diretamente nos resultados econômicos do negócio

e na escassez de recursos naturais devido ao menor favorecimento do uso de agregados alternativos.

Apesar das diversas normas vigentes que regulam as atividades ligadas aos resíduos sólidos no mundo, há ainda a necessidade de melhor integração, estruturação, independência técnica e funcional dos órgãos de controle ambiental para que as diversas exigências legais e normativas tenham efeito prático na redução dos impactos ambientais e no fomento do reuso e reciclagem.

Quanto ao fomento no uso do AEA, atualmente existem fóruns de discussão envolvendo o público-alvo em diversos países em desenvolvimento, como no Brasil, além de normas, declarações, certificações e protocolos de qualidade ambiental visando promover ainda mais o aproveitamento do AEA.

Contudo, conforme mencionado no tópico que fala dos elementos políticos e normativos, a maior parte deste resíduo ainda é enviada para aterros industriais, o que demonstra a necessidade de abertura para realização de mais fóruns de esclarecimentos com a participação dos tomadores de decisão para o fomento do uso do AEA em aplicações consolidadas, porque apesar destas existirem e serem viáveis, o aproveitamento ainda não é a principal via.

Elementos obrigatórios reconhecidos na forma de lei são os mais citados na literatura e os que mais tem influenciado no aproveitamento, além de apresentarem uma série de aspectos potencialmente positivos para o uso de agregados alternativos, como os de AEA e os de resíduos de construção civil.

Deve-se levar em conta, porém, outras barreiras nos países em desenvolvimento, como principalmente ambientes políticos instáveis, falta de diretrizes ambientais específicas para resíduos industriais, condições econômicas desafiadoras e infraestrutura envelhecida, infringindo insegurança para o crescimento do setor.

Políticas públicas devem estimular o uso dos agregados alternativos em relação ao uso de agregados virgens, tendo em vista o esgotamento dos recursos naturais de agregados, criando dessa forma demanda, pois não adianta se produzir agregado reciclado se não se tem onde utilizar.

Também pode incentivar empresas que beneficiam agregados recicláveis, na redução dos custos logísticos excessivos para transporte a locais distantes com o uso de instrumentos

econômicos, como subsídios, isenção de impostos, créditos ou assistência a empréstimos, abatimentos ou concessões.

Tais políticas também podem incluir multas, restrições ou taxas/tarifas sobre o uso de AN ou sobre o uso inadequado de agregados recicláveis, da mesma forma que podem incluir itens que especificam a qualidade dos agregados alternativos para atender a parâmetros de controle que norteiem o seu reaproveitamento sistemático, visto que a escolha destes em relação aos AN pode vir acompanhada de um protocolo de qualidade, certificação ou de uma declaração ambiental.

O Plano Nacional de Resíduos (Planares), recentemente aprovado no Brasil, traz diretrizes, estratégias, ações e metas para modernizar a gestão de resíduos sólidos no País, de forma a colocar em prática os objetivos previstos na PNRS em um horizonte de 20 anos (BRASIL, 2022).

O Planares determinou o aumento crescente da recuperação de resíduos, estabelecendo uma meta de 50% de aproveitamento em 20 anos na hierarquização das ações de gestão de resíduos no Brasil (BRASIL, 2022).

Entretanto, não foram estabelecidas diretrizes ou metas para o fomento do uso, por exemplo, de agregados alternativos em substituição ao AN. Diante disso, este trabalho buscou sugerir ações através de elementos, principalmente políticos, normativos e econômicos, que favoreçam o uso de agregados alternativos, como os de AEA, e servir de sugestão para revisões futuras não só do Plano Nacional, como também de planos estaduais e municipais de resíduos sólidos.

## 7 CONCLUSÕES

É evidente a preocupação e os esforços que pesquisadores estão dispensando na busca por novas formas de aplicação para o AEA, além da melhoria nas práticas de manejo e de beneficiamento, visando alcançar principalmente os objetivos de preservação ambiental evitando ou minimizando o uso de AN.

Da mesma forma, as siderúrgicas devem descontinuar o uso de tecnologias ultrapassadas, implementar novas tecnologias e elevar a eficiência das operações.

Atualmente, considerando todos os resíduos como um ativo econômico, o foco tem sido na geração zero de resíduos por meio, principalmente, de 100% de reuso ou reciclagem. Logo, existe a necessidade de encontrar não apenas alternativas de disposição final, mas buscar opções que considerem o problema dos resíduos de forma sistêmica e que englobem os elementos políticos, normativos, econômicos e o modelo produtivo como um todo, conforme apresentado no DCE.

A análise das potencialidades e desafios para o aproveitamento do AEA baseada nos elementos políticos, normativos e econômicos no uso do AEA em aplicações consolidadas é um tema escassamente explorado na literatura, especialmente em países em desenvolvimento, o que representa uma lacuna de pesquisa neste campo. Nos países em desenvolvimento, o fracasso de políticas ambientais se deve em grande parte à incapacidade de seus governos em fixar prioridades para os diversos problemas e intervenções.

Mesmo com a existência de formas de aplicação de AEA consolidadas, utilizadas especialmente em países desenvolvidos onde tem-se altas taxas de uso, as pesquisas sobre a influência destes elementos devem ser realizadas em países em desenvolvimento para motivar a elaboração de novas políticas públicas ou a melhoria das políticas existentes minimizando ou evitando o envio para aterros industriais. Políticas que favoreçam o aproveitamento de agregados alternativos, de forma que não seja um empecilho para o fortalecimento do reaproveitamento de forma adequada.

Os elementos econômicos, físicos e operacionais, de acordo com a literatura analisada, têm uma amplitude mais limitada que os elementos políticos e normativos, especificamente em termos de obrigatoriedade.

Um elemento político e normativo (em especial uma Lei ou uma Resolução, uma Diretiva ou uma Instrução Normativa) são documentos escritos e editados por uma autoridade competente e de acordo com um procedimento específico, que veiculam normas jurídicas obrigatórias. Por isso, são preferidos em relação aos demais elementos econômicos, físicos e operacionais e possuem um peso e uma influência maior, geralmente positiva em relação aos demais.

Esta afirmação no parágrafo anterior é uma lacuna que deve ser preenchida com pesquisas que demonstrem a real opinião do público-alvo, realizando comparações entre os pares, onde indivíduos (decisores) de cada grupo do público-alvo do universo a ser pesquisado possibilitará consolidar esta análise quanto aos elementos. Obtendo um consenso comum quanto a ordenação (hierarquização) das principais alternativas, de acordo com os elementos selecionados, para o aumento do aproveitamento de AEA em aplicações com viabilidade técnica comprovada.

Um questionário, com o uso de algum Método de Apoio à Decisão Multicritério, poderá ser direcionado aos três grupos específicos envolvidos com o tema: a) Órgãos Públicos; b) Entidades de classe que possuam relação com o tema; c) Empresas do setor Siderúrgico.

Essas sugestões, além dos parâmetros técnicos para as aplicações já consolidadas do AEA, são alternativas para regulamentar o aumento no aproveitamento destes resíduos, enquanto atividade promotora da sustentabilidade.

Conforme visto no DCE, este estudo apresentou as relações de causalidade entre esses elementos conjuntamente, sugere-se, para trabalhos futuros, que estes elementos sejam avaliados separadamente a fim de mensurar o grau de influência em cada eixo estudado, para proporcionar uma melhor hierarquização e auxílio aos tomadores de decisão quanto a melhor alternativa para fomento do uso do AEA.

Os resultados e conclusões da presente pesquisa contribuem para demonstrar as potencialidades e os desafios para o aproveitamento de agregado siderúrgico de escória de aciaria em países em desenvolvimento e o estado da arte sobre os elementos políticos, normativos, econômicos, físicos e operacionais que influenciam no aproveitamento do AEA, de modo a contribuir com futuras pesquisas e auxiliar tomadores de decisão na elaboração e implantação de novas políticas públicas ou na revisão de políticas públicas existentes, baseadas em estudos e aplicações de AEA já consolidadas.

## REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL BRASIL. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/aplicacoes>. Acesso em: 04 nov. 2021.

AGGREGATE FROM WASTE STEEL SLAG: quality protocol. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/aggregate-from-waste-steel-slag-quality-protocol>. Acesso em: 30 abr. 2021.

AJAYI, S. Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 102, p. 101–112, set. 2015.

AJAYI, S. *et al.* Policy imperatives for diverting construction waste from landfill: Experts' recommendations for UK policy expansion. *Journal of Cleaner Production*, v. 147, p. 57–65, mar. 2017.

AKHTAR, A. *et al.* Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 186, p. 262–281, mar. 2018.

ALRYALAT, S.; MALKAWI, L.; MOMANI, S. Comparing Bibliometric Analysis Using PubMed, Scopus, and Web of Science Databases. *Journal of Visualized Experiments (JoVE)*, v. 152, p. 58494, 2019.

ALZATE-ARIAS, S. *et al.* Assessment of government incentives for energy from waste in Colombia. *Sustainability (Switzerland)*, v. 10, n. 4, p. 1–16, 2018.

ANDERSSON, R. Public policies as obstacle to sustainable CDWM practices. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 588, n. 2, p. 022009, 21 nov. 2020.

ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela; QUARANTA, Eugenio. State of the art and perspectives in catalytic processes for CO<sub>2</sub> conversion into chemicals and fuels: The distinctive contribution of chemical catalysis and biotechnology. *Journal of Catalysis*, v. 343, p. 2–45, 2016.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.

ARM, M. *et al.* How Does the European Recovery Target for Construction & Demolition Waste Affect Resource Management? *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, n. 5, p. 1491–1504, 6 jul. 2017.

ASLAM, M. S.; HUANG, B.; CUI, L. Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, v. 264, p. 110445, jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro. 2004. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211. Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2005. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação – Especificação. Rio de Janeiro. 1987. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16364. Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento. Rio de Janeiro. 2015. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 52:2003. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 53:2003. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2003. 8p.

BAALAMURUGAN, J. *et al.* Recycling of steel slag aggregates for the development of high-density concrete: Alternative & environment-friendly radiation shielding composite. *Composites Part B: Engineering*, v. 216, p. 108885, 2021.

BALDAM, R. *et al.* Gerenciamento de Processos de Negócios-BPM: uma referência para implantação prática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

BALWADA, Jaideep; SAMAIYA, Shivam; MISHRA, Rajesh P. Packaging Plastic Waste Management for a Circular Economy and Identifying a better Waste Collection System using Analytical Hierarchy Process (AHP). *Procedia CIRP*, v. 98, p. 270-275, 2021.

BLAISI, N. I. Construction and demolition waste management in Saudi Arabia: Current practice and roadmap for sustainable management. *Journal of Cleaner Production*, v. 221, p. 167–175, jun. 2019.

BORGES, P. Uso da escória de aciaria como agregado siderúrgico: uma discussão sobre os aspectos ambientais e legais no Brasil. 2020. 1 recurso online (86 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP.

BRANCA, T. *et al.* Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in europe. *Metals*, v. 10, p. 345, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF*, 02 ago. 2010.

CADORET, I.; GALLI, E.; PADOVANO, F. How do governments actually use environmental taxes? *Applied Economics*, v. 52, n. 48, p. 5263–5281, 2020.

CALVO, N.; VARELA-CANDAMIO, L.; NOVO-CORTI, I. A Dynamic Model for Construction and Demolition (C&D) Waste Management in Spain: Driving Policies Based on Economic Incentives and Tax Penalties. *Sustainability*, v. 6, n. 1, p. 416–435, 20 jan. 2014.

CARIMAN, I. Impactos de políticas públicas aplicadas na viabilidade econômica usinas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição. 2021. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Vitória, ES.

CE100 BRASIL. Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial. Disponível em: [https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil\\_Uma-Exploracao-Inicial.pdf](https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf). Acesso em: 29 set. 2021.

CLARIVATE. Journal Citation Reports. Disponível em: <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/journal-citation-reports/>. Acesso em: 29 de jul. 2022.

CONKE, L., “Barriers to waste recycling development: evidence from Brazil”, *Resources, Conservation, Conservation and Recycling*, Vol. 134 No. 1, pp. 129-135, 2018.

COSTA, L. *et al.* Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 318, p. 126152, feb. 2022.

CHAUDHARY, K. *et al.* (2018). Case study analysis of e-waste management systems in Germany, Switzerland, Japan and India: a RADAR chart approach. *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 25, No. 9, pp. 3519-3540.

CHAUDHARY, K. *et al.* Benchmarking Indian ceramic enterprises based on green supply chain management pressures, practices and performance. *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 25, No. 9, p. 3628-3653, 2018.

CHAVES, G. *et al.* Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 288, p. 112401, 2021.

CHEN, H. *et al.* Business Intelligence and Analytics: From Big Data To Big Impact. MIS Quarterly, v. 36, p. 1165–1188, 2012.

COLLINS, D. Pretesting survey instruments: an overview of cognitive methods. Quality of life research, v. 12, n. 3, p. 229-238, 2003.

CUI, P., WU, S., XIAO, Y., HU, R., YANG, T., 2021. Environmental performance and functional analysis of chip seals with recycled basic oxygen furnace slag as aggregate. Journal of Hazardous Materials, v. 405, p. 12441, mar. 2021.

CUI, P., WU, S., XIAO, Y., YANG, C., WANG, F., 2020. Enhancement mechanism of skid resistance in preventive maintenance of asphalt pavement by steel slag based on micro-surfacing. Construction and Building Materials, v. 239, p. 117870, abr. 2020.

DAI *et al.* Stability of steel slag as fine aggregate and its application in 3D printing materials. Construction and Building Materials. V. 299, p. 123938, 2021.

DAS *et al.* Waste to wealth: Recovery of value-added products from steel slag. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, p. 105640, 2021.

DARKO, A. *et al.* Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. International journal of construction engineering and management, v. 19, n. 5, p. 436-452, 2019.

DARON, J. Challenges in using a Robust Decision Making approach to guide climate change adaptation in South Africa. Climatic Change, v. 132, n. 3, p. 459-473, 2015.

DEATON, M. *et al.* Dynamic modeling of environmental systems. Springer Science & Business Media, 2000.

DE MENDONÇA, R. *et al.* Uso adequado da escória de aciaria - parte 1. Disponível em: <http://www.guiadasiderurgia.com.br/novosb/component/content/article/50-materias47/204-escoria-de-aciaria>. Acesso em: 01 maio 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 406/2017 - ES. Pavimentação rodoviária - Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® - Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2017. 10p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de->

normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit\_406\_2017\_es-2.pdf. Acesso em: 20 jun. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 407/2017 - ES. Pavimentação rodoviária - Sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita® - Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2017. 10p. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit\\_407\\_2017\\_es.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_407_2017_es.pdf). Acesso em: 20 jun. 2021.

DE SOUZA, R. L. R. Teoria Geral dos Sistemas e Dinâmica de Sistemas– Similaridades e possibilidades em Administração. Revista Espaço Acadêmico, v. 11, n. 131, p. 81-88, 2012.

DEUTZ, P. *et al.* Resource recovery and remediation of highly alkaline residues: A political-industrial ecology approach to building a circular economy. Geoforum, v. 85, p. 336-344, 2017.

DI FILIPPO, J.; KARPMAN, J.; DESHAZO, J. R. The impacts of policies to reduce CO2 emissions within the concrete supply chain. Cement and Concrete Composites, v. 101, n. August 2018, p. 67–82, ago. 2019.

DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Disponível em: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2008/98/contents>. Acesso em: 16 jun. 2021.

DIRECTIVE 2018/851 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L0851>. Acesso em: 16 jun. 2021.

DING *et al.* A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. Waste Management, v. 51, p. 130-141, 2016.

DI MARIA *et al.* Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 23, p. 2091–2109, fev. 2018.

DI NOLA *et al.* Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy. Waste management, v. 78, p. 717-729, 2018.

DIOTTI, A. *et al.* Chemical and Leaching Behavior of Construction and Demolition Wastes and Recycled Aggregates. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, v. 12, p.10326, dez. 2020.

DONDI, G. *et al.* Use of Steel Slag as an Alternative to Aggregate and Filler in Road Pavements. *Materials*, v. 14, n. 2, p. 345, 2021.

DONG, Q., WANG, G., CHEN, X. Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview. *Journal of Cleaner Production*, v. 282, p. 124447, 2021.

DUAN, H. *et al.* Construction debris becomes growing concerns of growing cities. *Waste Management*, v. 83, p. 1–5, 2019.

DUAN, H. *et al.* Construction debris becomes growing concerns of growing cities. *Waste Management*, v. 83, p. 1–5, 2019.

DUAN, H.; LI, J. Construction and demolition waste management: China's lessons. *Waste Management and Research*, v. 34, n. 5, p. 397–398, 2016.

DUAN, H. *et al.* Developing countries: growing threat of urban waste dumps. *Nature*, v. 546, p. 599, 2017.

DUTRA, L. *et al.* A Sustentabilidade Financeira dos Serviços de Manejo de Resíduos Sólidos: Modelos de cobrança ao redor do mundo. Brasil: EY, 2020.

ESPÍRITO SANTO, 2019. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS/ES). Disponível em: <https://seama.es.gov.br/plano-estadual-de-residuos-solidos>. Acesso em: 01 ago. 2021.

FAN, C. *et al.* Modeling computer recycling in Taiwan using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 128, p. 167-175, 2018.

FAN, Y. *et al.* Cross-disciplinary approaches towards smart, resilient and sustainable circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 232, p. 1482–1491, 2019.

FAN, D. *et al.* A new development of eco-friendly Ultra-High performance concrete (UHPC): Towards efficient steel slag application and multi-objective optimization. *Construction and Building Materials*. v. 306, p. 124913, 2021.

FECHER B, FRIESIKE S, HEBING M. O que impulsiona o compartilhamento de dados acadêmicos? DOI: 10.1371/journal.pone.0118053. PMID: 25714752; PMCID: PMC4340811. PLoS Um, v. 10, p. 0118053, fev. 2015.

FISHER, L. The recycling and reuse of steelmaking slags - A review. Resour. Conserv. Recycl., v. 146, p. 244–255, 2019.

FILIPPO, J.; KARPMAN, J.; DESHAZO, J. R. The impacts of policies to reduce CO2 emissions within the concrete supply chain. Cement & Concrete Composites. v. 101, p. 67–82, ago. 2019.

FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. Apostila. Fortaleza: UEC, 2002.

FREITAS, S. *et al.* Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 20, n. 5, p. 1087-1095, 2018.

FU, Q. *et al.* Mechanical performance, microstructure, and damage model of concrete containing steel slag aggregate. Structural Concrete, p. 1–19, jul. 2022.

GÁLVEZ-MARTOS, J. L. *et al.* Construction and demolition waste best management practice in Europe. Resources, Conservation and Recycling, v. 136, p. 166–178, set. 2018.

GAO *et al.* Compaction Procedures and Associated Environmental Impacts Analysis for Application of Steel Slag in Road Base Layer. Sustainability (Basel, Switzerland). Vol. 13, p. 4396, 2021.

GENCEL, Osman *et al.* Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. Construction and Building Materials, v. 283, p. 122783, 2021.

GEORGE, A. *et al.* The world is facing a \$15 trillion infrastructure gap by 2040. Here's how to bridge it, 2019. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2019/04/infrastructure-gap-heres-how-to-solve-it/>. Acesso em: 15 abr. 2022.

GEO-OBRAS ES. Disponível em: <https://geobras.tce.es.gov.br/cidadao/>. Acesso em: 16 jan. 2022.

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

GHOSH, D., SHAH, J., SWAMI, S. Product greening and pricing strategies of firms under green sensitive consumer demand and environmental regulations. *Annals of Operations Research*, v. 290, p. 491–520, 2020.

GHOSH, A., GHOSH, A. K. Solid Waste Management in Steel Industry - Challenges and Opportunities. *Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies*, p. 299–307, Springer, Singapura, 2019.

GHISELLINI, P. *et al.* Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 195, p. 418–434, 2018.

GIANNIS, A.; CHEN, M.; YIN, K.; TONG, H.; VEKSHA, A. Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 19, n. 3, p. 1177-1185, 2017.

GOLI, A. The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, p. 00861, jun. 2022. ISSN 2214-5095, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00861>.

GUO, Hua; ZHANG, Tianzhu. Sinks of steel in China—addition to in-use stock, export and loss. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, v. 10, n. 1, p. 141-149, 2016.

GUO, Jianlong; BAO, Yanping; WANG, Min. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste management*, v. 78, p. 318-330, 2018.

GUO, Y.; XIE, J.; ZHAO, J.; ZUO, K. Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal- and high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, v. 204, p. 41–49, 2019.

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

HINA, M. *et al.* Drivers and barriers of circular economy business models: Where we are now, and where we are heading? *Journal of Cleaner Production*, v. 333, p. 130049, jan. 2022.

HADIAN, S.; MADANI, K. A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? *Ecological Indicators*, v. 52, p. 194-206, 2015.

HADKA, David *et al.* An open-source framework for many-objective robust decision making. *Environmental Modelling & Software*, v. 74, p. 114-129, 2015.

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

HART, C. Fazendo uma revisão de literatura: Liberando a imaginação da pesquisa. Londres: *Sage Publications*, 1998.

HERCZEG, G. *et al.* Supply chain collaboration in industrial symbiosis networks. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 171, No. 1, p. 1058-1067, jan. 2018.

HM TREASURY. Guide to developing the project business case. Disponível em: [extension://elhekieabhbkmcefcobjddigjcaadp/https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/749086/Project\\_Business\\_Case\\_2018.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/749086/Project_Business_Case_2018.pdf)  
Acesso em: 01 ago. 2021.

HO, Peter. *Greening Industries in Newly Industrializing Economies*. Routledge, 2013. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=-KXrAgAAQBAJ&pg=PA196&lpg=PA196&dq=The+Singapore+government+has+built+a+recycling+industrial+park+and+leases+it+out+to+recycling+companies+at+a+low+rental+rate&source=bl&ots=oWDusCSLK8&sig=ACfU3U2TtRB17fEyLQXPZRC6oOnX4UCPpw&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwjmgry19I\\_7AhXpupUCHTHnC98Q6AF6BAglEAM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=-KXrAgAAQBAJ&pg=PA196&lpg=PA196&dq=The+Singapore+government+has+built+a+recycling+industrial+park+and+leases+it+out+to+recycling+companies+at+a+low+rental+rate&source=bl&ots=oWDusCSLK8&sig=ACfU3U2TtRB17fEyLQXPZRC6oOnX4UCPpw&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwjmgry19I_7AhXpupUCHTHnC98Q6AF6BAglEAM#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 02 nov. 2022.

HOPKINS, M. J. *et al.* Resource recovery and low carbon transitions: The hidden impacts of substituting cement with imported ‘waste’ materials from coal and steel production. *Global Environmental Change*, v. 53, p. 146-156, nov. 2018.

HOSSAIN, Md Uzzal; SOHAIL, Ammar; NG, S. Thomas. Developing a GHG-based methodological approach to support the sourcing of sustainable construction materials and products. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 145, p. 160-169, 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. *Cidades*. Brasil: IBGE. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>. Acesso em: 15 Jul. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade da indústria brasileira do aço – 2018. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacao/relatorio-de-sustentabilidade-2018/>. Acesso em: 15 jul. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade da indústria brasileira do aço – 2021. Rio de Janeiro. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/SUSTENTAB\\_digital\\_2021.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/SUSTENTAB_digital_2021.pdf). Acesso em: 15 jul. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário Estatístico – 2021. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>. Acesso em: 15 set. de 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Steel & Sustainability* – 2021. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>. Acesso em: 15 set. de 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). Anuário Aço Brasil 2022. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/07/AcoBrasil\\_Anuario\\_2022.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/07/AcoBrasil_Anuario_2022.pdf). Acesso em: 29 set. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). Dados do setor. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/SUSTENTAB\\_digital\\_2021.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/SUSTENTAB_digital_2021.pdf). Acesso em: 29 set. 2022.

ISHIZAKA, Alessio; LABIB, Ashraf. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert systems with applications*, v. 38, n. 11, p. 14336-14345, 2011.

JAPÃO, 2000. Fundamental Law for Establishing a Sound Material-Cycle Society. Disponível em: <https://www.gdrc.org/uem/waste/japan-3r/3-basiclaw.pdf>. Acesso em: 21 maio 2021.

JAPÃO, 2001. Green Purchasing Law. Disponível em: [https://www.japanfs.org/en/news/archives/news\\_id027760.html](https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027760.html). Acesso em: 31 maio 2021.

JIA, *et al.* Dynamic analysis of construction and demolition waste management model based on system dynamics and grey model approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1594-3>. Acesso em: 04 abr. 2021.

KAMALI, M.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*, v. 204, p. 109479, 2019.

KANG, Le *et al.* Systematic research on the application of steel slag resources under the background of big data. *Complexity*, v. 2018, 2018.

KAUR, Puneet *et al.* Systematic literature review of food waste in educational institutions: setting the research agenda. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, v. 33, n. 4, p. 1160-1193, 2020.

KAZAZ, A.; ULUBEYLI, S.; ATICI, M. Economic viability analysis for fresh concrete waste reclaimers: The capacity of leftover concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 22, n. 1, p. 12–23, 27 jan. 2018.

KIM, J. *et al.* Effect of amorphous metallic fibers on strength and drying shrinkage of mortars with steel slag aggregate. *Materials*, v.14, p. 5403, 2021.

KING, *et al.* Confronting the Urban Housing Crisis in the Global South: Adequate, Secure, and Affordable Housing, *World Resour. Inst. Asia, Africa e Latin America: Working Paper*, jul. 2017.

KITTITHORN, S. *et al.* Feasibility study of reverse logistic of steel waste in the construction industry. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. v. 40, p. 271-277, mar. 2018.

KOLLIKKATHARA, N., FENG, H.; YU, D. A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. *Waste Management*, v. 30, p. 2194-2203, 2010.

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

KRAUJALIENE *et al.* Comparative Analysis of Multicriteria Decision-Making Methods Evaluating the Efficiency of Technology Transfer. *Business Management and Education*, v. 17, p. 72-93, 2019.

KUMAR, Pravin; SINGH, Rajesh Kumar. Selection of sustainable solutions for crop residue burning: an environmental issue in northwestern states of India. *Environment, Development and Sustainability*, v. 23, n. 3, p. 3696-3730, 2021.

LAKATOS, E. *et al.* Fundamentos de metodologia científica. 5. reimp. São Paulo: Atlas, v. 310, 2007.

LEE, M. *et al.* Environmental Assessment of Recycling (EAoR) for Safe Recycling of Steelmaking Slag in the Republic of Korea: Applications, Leaching Test, and Toxicity. *Sustainability*, v. 13, n. 16, p. 8805, 2021.

LEME, M. *et al.* Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 87, p. 8–20, 2014.

LI, J. *et al.* Designers' attitude and behaviour towards construction waste minimization by design: A study in Shenzhen, China. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 105, p. 29–35, dez. 2015.

LI, J. *et al.* Willingness to pay for higher construction waste landfill charge: A comparative study in Shenzhen and Qingdao, China. *Waste Management*, v. 81, p. 226–233, nov. 2018.

LI, J. *et al.* Key policies to the development of construction and demolition waste recycling industry in China. *Waste Management (Elmsford)*, v. 108, p. 137–143, 2020.

LI, J. *et al.* Carbonation Curing on Magnetically Separated Steel Slag for the Preparation of Artificial Reefs. *Materials (Basel)*, v. 15, p. 2055, 2022.

LI, P. *et al.* Do environmental taxes reduce air pollution? Evidence from fossil-fuel power plants in China. *Journal of Environmental Management*, v. 295, p. 113112, out. 2021.

LIIKANEN, M. *et al.* Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites e Assessment of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, v. 225, p. 716-727, 2019.

LIU, Q. *et al.* Utilization potential of aerated concrete block powder and clay brick powder from C&D waste. *Construction and Building Materials*, v. 238, p. 117721, mar. 2020.

LIU, C. *et al.* System dynamics analysis on characteristics of iron-flow in sintering process. *Appl Thermal Eng*, v. 82, p. 206–211, maio 2015.

LIU, G. *et al.* Environmental tax reform and environmental investment: A quasi-natural experiment based on China's Environmental Protection Tax Law. *Energy Economics*, v. 109, p. 106000, maio 2022.

LLATAS, C. *et al.* An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. *Waste Management*, v. 126, p. 608–622, 2021.

LOCKREY, S. *et al.* Recycling the construction and demolition waste in Vietnam: opportunities and challenges in practice. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 757–766, out. 2016.

LOPEZ, G., FARFAN, J., BREYER, C. Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel. *Journal of Cleaner Production*, v. 375, 134182, nov. 2022.

LÓPEZ-ROBLES, J.R., Otegi-Olaso, J.R., Porto Gómez, I., Cobo, M.J. 30 years of intelligence models in management and business: A bibliometric review. *Int. J. Inf. Manage*, v. 48, p. 22–38, 2019.

LUO, Q., GROSSULE, V., LAVAGNOLO, M. C. Washing of residues from the circular economy prior to sustainable landfill: Effects on long-term impacts. *Waste Management & Research*, v. 41, p. 585-593, out. 2022.

LU, H., XIAO, L., WANG, T., Lu, S., WANG, H., GUO, X., LI, J. The application of steel slag in a multistage pond constructed wetland to purify low-phosphorus polluted river water. *Journal of Environmental Management*, v. 292, p. 112578, ago. 2021.

LU, C., WANG, S., WANG, K., GAO, Y., ZHANG, R. Uncovering the benefits of integrating industrial symbiosis and urban symbiosis targeting a resource-dependent city: A case study of Yongcheng, China. *Journal of Cleaner Production*, v. 255, p. 120210, maio 2020.

LV, H. *et al.* Examining construction waste management policies in mainland China for potential performance improvements. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 23, n. 2, p. 445–462, 28 mar. 2020.

MA, M. *et al.* Challenges in current construction and demolition waste recycling: A China study. *Waste Management*, v. 118, p. 610–625, dez. 2020.

MACHADO, C. *et al.* Social and Environmental Innovations in Brazilian Siderurgy. *RAIMED: Revista de Administração IMED*, v. 10, n. 2, abr. 2020.

MARIA, A. *et al.* Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 23, n. 11, p. 2091-2109, 2018.

MARTINS, A. *et al.* Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. *Construction and Building Materials*, v. 291, p. 123265, 2021.

MORECROFT, J. D. W. 2015. *Strategic Modelling and Business Dynamics: A feedback systems approach*. Second Edi. Chichester: WILEY.

MOTTA, G. D. S.; Quintella, R. H. Avaliação de critérios não financeiros na seleção de projetos de investimento para financiamento de capital semente: a contribuição da cienciometria e patenteometria. *Revista de Gestão de Tecnologia e Inovação*, v. 7, p. 172-193, 2012.

MHATRE, Purva; GEDAM, Vidyadhar V.; UNNIKRISHNAN, Seema. Material circularity potential for construction materials–The case of transportation infrastructure in India. *Resources Policy*, v. 74, p. 102446, 2021.

MINKOV *et al.* Type III Environmental Declaration Programmes and harmonization of product category rules: status quo and practical challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 94, p. 235-246. 2015.

MUNGUÍA-LÓPEZ, A. DEL C. *et al.* Optimization of municipal solid waste management using a coordinated framework. *Waste management (New York, N.Y.)*, v. 115, p. 15–24, set. 2020.

MUZAFFAR, S. *et al.* Analysing the Causes of Design Generated Waste through System Dynamics. *KSCE J. Civ. Eng.*, v. 26, p. 4912–4925, 2022.

NARASIMHAN, B., BHALLAMUDI, S.M., MONDAL, A., GHOSH, S., MUJUMDAR, P. Chennai Floods 2015: A Rapid Assessment. Indian Institute of Science: Bangalore, maio 2016.

NGUYEN, L. H. *et al.* Steel slag quality control for road construction aggregates and its environmental impact: case study of Vietnamese steel industry—leaching of heavy metals from steel-making slag. *Environmental Science and Pollution Research*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 41983-41991, 2022.

NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. Suresh. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. *Journal of Cleaner Production*, v. 231, p. 856-871, 2019.

NOAMAN, AWS S. *et al.* A suggestion of a procedural method for the management of post-war waste. *Civil Engineering Journal*, v. 5, n. 10, p. 2143–2144, out. 2019.

NUNES *et al.* Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, v. 281, p. 122605, 2021.

OLIVEIRA, L. J. C. *et al.* Waste management: An analysis of the impacts of the generation of tailings in civil construction. *Brazilian of Development*, v. 6, n. 5, p. 24447-24462, 2020.

OLOFINNADE, O. *et al.* Solid waste management in developing countries: Reusing of steel slag aggregate in eco-friendly interlocking concrete paving blocks production. *Case Stud. Constr. Mater.*, v. 14, p. 00532, jun. 2021.

PANG, B.; ZHOU, Z.; XU, H. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. *Construction & building materials*, v. 84, p. 454-467, 2015.

PESSIN, V.Z.; YAMANE, L.H.; SIMAN, R.R. Smart Bibliometrics: an integrated method of science mapping and bibliometric analysis. *Scientometrics*, v. 127, p. 3695–3718, 2022.

PERTEGHELLA, A. *et al.* Utilizing an integrated assessment scheme for sustainable waste management in low and middle-income countries: Case studies from Bosnia-Herzegovina and Mozambique. *Waste Management*, v. 113, p. 176-185, 2022.

PHONPHOTON, N.; PHARINO, C. A system dynamic modeling to evaluate flooding impacts on municipal solid waste management services. *Waste Management*, v. 87, p. 525-536, 2019.

PILONETA *et al.* Application of Steel Slag for Degraded Land Remediation. *Land (Basel)*, v. 11, p. 224, 2022.

PINTO, J. T. M.; SVERDRUP, H. U.; DIEMER, A. Integrating life cycle analysis into system dynamics: the case of steel in Europe. *Environmental Systems Research*, v.8, maio 2019.

PIZZANI, L. *et al.* A arte da pesquisa bibliográfica na busca do conhecimento. *RDBCI: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação*, v. 10, n. 2, p. 53-66, 2012.

POVETKIN, K. *et al.* Identifying and addressing latent causes of construction waste in infrastructure projects. *Journal of Cleaner Production*, v. 266, p. 122024, set. 2020.

PRUYT, E. *Small System Dynamics Models for Big Issues: Triple Jump towards Real-World Complexity*. Delft: TU Delft Library, 2013.

RATNAWATI, B. *et al.* Waste processing techniques at the landfill site using the material flow analysis method. *Global Journal of Environmental Science and Management*, v. 9, p. 73-86, 2023.

REINO UNIDO. Aggregate from waste steel slag: quality protocol. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/aggregate-from-waste-steel-slag-quality-protocol>. Acesso em: 30 abr. 2021.

RIDI, *et al.* Water as a Probe of the Colloidal Properties of Cement. *Langmuir*, v. 34, n. 6, p. 2205–2218, out. 2018.

RODRÍGUEZ, G. *et al.* Assessment of Construction and Demolition Waste plant management in Spain: in pursuit of sustainability and eco-efficiency. *Journal of Cleaner Production*, v. 90, p. 16-24, mar. 2015.

RUIZ, L. *et al.* The circular economy in the construction and demolition waste sector - A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 248, p. 119238, mar. 2020.

RYAN *et al.* Causal Loop Diagram Aggregation Towards Model Completeness. *Systemic Practice and Action Research*, v. 34, p. 37–51, 2021.

SADENOVA, M.; UTEGENOVA, M.; KLEMEŠ, J. Synthesis of new materials based on metallurgical slags as a contribution to the circular economy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 21, p. 2047-2059, 2019.

SANCHETA, L.; CHAVES, G.; SIMAN, R. R. The use of system dynamics on urban solid waste management: a literature analysis. *Gestão & Produção*, v. 28, 2021.

SANTOS, M. R.; DIAS, L. C.; CUNHA, M. C.; MARQUES, J. R. Multicriteria Decision Analysis Addressing Marine and Terrestrial Plastic Waste Management: A Review. *Frontiers in Marine Science*, v. 8, p. 747712, 2022.

SARKAR, S.; MAZUMDER, D. Solid waste management in steel industry-challenges and opportunities. *International Journal of Nuclear Energy. Science and Technology*, v. 9, p. 984-987, 2015.

SELLITO, M. A. Reverse logistics activities in three companies of the process industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, No. 1, p. 923-931, mar. 2018.

SELLITO, M. A.; ALMEIDA, F. A. Strategies for value recovery from industrial waste: case studies of six industries from Brazil. *Benchmarking (Bradford)*. v. 27, n. 2, p. 867-885, out. 2020.

SHARBA, A. The efficiency of steel slag and recycled concrete aggregate on the strength properties of concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 23, n. 11, p. 4846-4851, 2019.

SHOOSHTARIAN, S. *et al.* Extended Producer Responsibility in the Australian Construction Industry. *Sustainability*, v. 13, n. 2, p. 620, 11 jan. 2021.

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

SINGAPURA. Zero Waste Masterplan. Disponível em: <https://www.towardszerowaste.gov.sg/zero-waste-masterplan/>. Acesso em: 17 abr. 2023.

SIMAN, R. *et al.* Governance tools: Improving the circular economy through the promotion of the economic sustainability of waste picker organizations. *Waste Management*, v. 105, p. 148-169, 2020.

SIMAN, R. *et al.* The use of system dynamics on urban solid waste management: a literature analysis. Disponível em: <https://lagesa.ufes.br/pt-br/publicacoes-cientificas>. Acesso em: 17 mar. 2021.

SŁOWIK, M., CEPA, P., CZAPLA, K., ŻABIŃSKI, P. Steel packaging production process and a review of new trends. *Archives of Metallurgy and Materials*. V. 66, p. 135-143, 2021.

SÖDERHOLM, P. Taxing virgin natural resources: Lessons from aggregates taxation in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 11, p. 911–922, set. 2011.

SONG *et al.* Use of Steel Slag as Sustainable Construction Materials: A Review of Accelerated Carbonation Treatment. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 173, p. 105740, 2021.

STERMAN, J. D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. [S.l.]: MCGraw-Hill Companies, Inc, 2000.

SWATHI, M. *et al.* Design of asphalt mixes with steel slag aggregates using the Bailey method of gradation selection. *Construction and Building Materials*, v. 279, p. 122426, 2021.

TANGTINTHAI, N.; HEIDRICH, O.; MANNING, D. A. C. Role of policy in managing mined resources for construction in Europe and emerging economies. *Journal of Environmental Management*, v. 236, p. 613–621, abr. 2019.

TEGEGNE *et al.*, 2016. A qualitative system dynamics approach to understanding destination image. *Journal of Destination Marketing & Management* 8:14-22, DOI: 10.1016/j.jdmm.2016.09.001. Disponível em: <https://www.sciencegate.app/document/10.1016/j.jdmm.2016.09.001>. Acesso em: 17 mar. 2021.

ULUGÖL, H. *et al.* Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, v. 280, Part 1, p. 124358, jan. 2021.

VÁCLAVÍK, V. *et al.* Sustainability potential evaluation of concrete with steel slag aggregates by the LCA method. *Sustainability Journal*, v. 12, p. 1-21, 2020.

VENTANA SYSTEMS: Software Vensim PLE. Versão: Vensim® PLE for Windows Version 8.2.1. Copyright Ventana Systems, Inc.. Disponível em: <https://vensim.com/download/>. Acesso em: 17 nov. 2022.

XIA, B.; DING, T.; XIAO, J. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. *Waste Management*, v. 105, p. 268 - 278, 2020.

XIAO, S.; DONG, H.; GENG, Y.; TIAN, X.; LIU, C.; LI, H. Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, p. 121366, 2020.

XU, M.; YUAN, H. A. Multi-objective Robust Optimization Model for Site selection of Construction Waste Facilities under Uncertainty. *Ind. Eng. J. (in Chinese)*, v. 22, p. 82–93, 2019.

WALMSLEY, T. G.; ONG, B. H. Y., KLEMES, J. J., TAN, R.R. Circular Integration of processes, industries, and economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 107, p. 507–515, 2020.

WANG, J. *et al.* Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production*, v. 206, p. 1004–1014, 2019.

WASKOW, R. *et al.* Optimization And Dust Emissions Analysis Of The Air Jigging Technology applied to the recycling of construction and demolition waste. *Journal of environmental management*, v. 266, p. 110614, jul. 2020.

WEI, C. *et al.* Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. *Construction and Building Materials*. V., 218, p. 483–496, 2019.

WISCONSIN ACT 285. Disponível em:

<https://docs.legis.wisconsin.gov/2017/related/acts/285>. Acesso em: 29 set. 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/>. Acesso em: 15 jul. 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Disponível em: [https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/P1\\_crude\\_steel\\_total\\_pub/CHN/IND](https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND). Acesso em: 29 set. 2022.

WU, H. *et al.* Demolition waste generation and recycling potentials in a rapidly developing flagship megacity of South China: Prospective scenarios and implications. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 1007–1016, jun. 2016.

WU, H. *et al.* Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 240, p. 118163, dez. 2019.

YAMANE *et al.*, 2021. Políticas públicas para o aumento da cobertura das coletas de resíduos. Disponível em: <https://lagesa.ufes.br/pt-br/publicacoes-cientificas>. Acesso em: 17 mar. 2021.

YANGSEN, C *et al.* Thermal Conductivity Evaluation and Road Performance Test of Steel Slag Asphalt Mixture. *Sustainability*, MDPI, v. 14, p. 1-19, jun. 2022.

ULUGÖL, H. *et al.* Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, v. 280, Part 1, p. 124358, jan. 2021.

YUAN, H. Barriers and countermeasures for managing construction and demolition waste: A case of Shenzhen in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 157, p. 84–93, 2017.

YUAN, H. *et al.* A model for cost–benefit analysis of construction and demolition waste management throughout the waste chain. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, p. 604–602, 2011.

ZHANG *et al.* The potential utilization of slag generated from iron and steelmaking industries: a review. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 42, p.1321-1334, maio 2020.

ZHENG, L. *et al.* Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Construction and Building Materials*, v. 136, p. 405-413, abr. 2017.

ZHU, J. *et al.* Efforts for a Circular Economy in China: A Comprehensive Review of Policies. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, n. 1, p. 110–118, 15 fev. 2019.

ZUIDERWIJK, A.; SHINDE, R.; JENG, W. What drives and inhibits researchers to share and use open research data? A systematic literature review to analyze factors influencing open research data adoption, PLoS ONE. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239283>. Acesso em: 25 fev. 2021.