


# Agregado siderúrgico de escória de aciaria: potencialidades e entraves para o aproveitamento em países em desenvolvimento

Leonardo Dias de Abreu<sup>1</sup> 

Tânia Galavote<sup>1\*</sup> 

Luciana Harue Yamane<sup>1</sup> 

Renato Ribeiro Siman<sup>1</sup> 

## Resumo

Em decorrência da crescente demanda mundial por agregado natural, busca-se a substituição por agregados reciclados produzidos a partir de escória siderúrgica em obras de infraestrutura pública. Entretanto, são relatadas diversas barreiras que dificultam o aproveitamento desses coprodutos e promovem a sua destinação para aterros industriais em países em desenvolvimento. Portanto, para esclarecer as principais dificuldades e entraves, foi realizada uma revisão sistematizada bibliográfica e documental. A partir disso, elaborou-se um diagrama de causa e efeito para representar as inter-relações entre os elementos identificados e a utilização do agregado de escória de aciaria. Os resultados apontam que elementos políticos e normativos, especificamente relacionados a obrigatoriedade, são preferidos e geralmente têm maior relevância em comparação aos demais, sendo os que mais influenciam sua utilização. Além disso, apresentam uma série de aspectos potencialmente positivos para a utilização de agregados alternativos. Cabe salientar, também, que esta pesquisa visa colaborar com a indicação de potencialidades e desafios para o uso de escória siderúrgica em países em desenvolvimento, contribuir para pesquisas futuras e auxiliar os tomadores de decisão na elaboração, revisão e implementação de novas políticas públicas.

**Palavras-chave:** Escória siderúrgica; Agregado de escórias de aciaria; Reúso; Reciclagem.

## Steel slag aggregate: potentialities and challenges for use in developing countries

### Abstract

As a result of the global growing demand for natural aggregate, there is a search for a replacement for recycled aggregates produced from steel slag in public infrastructure works. However, several barriers hindering the use of this waste have been reported and promoting its destination for industrial landfills in developing countries. Therefore, a systematic bibliographic and document review was carried out to shed light on the main difficulties reported in the literature. This enabled, an attempt was made to represent, through a cause-and-effect diagram, the interrelationships between the identified elements and the use of steel slag aggregate. Political and normative elements, specifically in terms of obligation, are preferred and generally have greater relevance about 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. Moreover, this research aims to contribute to indicating the potential and challenges for the use of steel slag in developing countries, to contribute to future research, and to assist decision-makers in the elaboration, review, and implementation of new public policies.

**Keywords:** Steel slag; Steel slag aggregate; Reuse; Recycling.

### 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 gerará a escassez desses materiais para a construção civil [1]. Diante disso, a indústria siderúrgica vem contribuindo

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, ES, Brasil.

\*Autor correspondente: [tania.pinto@ufes.br](mailto:tania.pinto@ufes.br)



com o desenvolvimento sustentável, a medida em que pode oferecer subprodutos úteis para a produção de concreto, sendo possível desenvolver agregados alternativos, como o agregado de escória de aciaria (AEA) [1,2]. O AEA pode ser utilizado, por exemplo, na metalurgia, na extração de elementos valiosos, na indústria da construção civil como aglutinante, na fabricação de fertilizantes, na mistura para fabricação de asfalto e em sistemas de purificação de água [1,3-13]. Contudo, a engenharia rodoviária tem sido o principal campo de aplicação de AEA [5].

As escórias de aciaria tem um potencial expansivo como fator limitante para sua reutilização direta em base e revestimento primário de rodovias, e seu beneficiamento inadequado pode acarretar problemas de durabilidade e desempenho [14]. Entretanto, por meio da exposição a intempéries (chuva, ar etc.) ocorre a hidratação e estabilização dos óxidos expansivos, tornando-a uma solução econômica e ambientalmente vantajosa [14]. Diversos estudos mencionam a viabilidade técnica de aplicação da AEA na construção de rodovias e fabricação de asfalto, assim como na fabricação de matérias-primas aplicadas a cobertura e isolamento, tratamento de água, filtros, artefatos de concreto, enchimentos de materiais cimentícios, reciclagem de ferro e correção do solo na agricultura [3,4,12,15-17].

Como observado, embora existam diversas possibilidades de aproveitamento da AEA, sua utilização se apresenta de forma diversificada entre os países. Em países desenvolvidos, por exemplo, é extensamente reciclado, porém, em países em desenvolvimento, como no Brasil, a sua reutilização representa apenas 20%, enquanto 26% têm sido comercializados principalmente para a aplicação em base e sub-base de estradas [18]. Tal cenário está relacionado à falta de incentivo ao uso de AEA e à carência de legislação direcionada, que se caracterizam como os principais desafios para a reutilização em larga escala de AEA [8]. Para Perteghella et al. [19], por exemplo, 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 limitadas [19]. As normas técnicas publicadas no Brasil [20-22] que dispõem sobre a utilização do AEA em pavimentação confirmam sua viabilidade técnica. Contudo, a falta de políticas públicas direcionadas para o cumprimento compulsório ou padronização de diretrizes ambientais retarda sua ampla aplicação [23]. 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 [24]. Contudo, a escassez de incentivos econômicos ou de desoneração fiscal

para empresas que fazem o beneficiamento de escória reduz a taxa de utilização e sua aplicação [24].

Embora muitos estudos abordem amplamente novos tipos de aplicação e a busca por melhorias nas propriedades físico-químicas do AEA, a literatura, além de tratar principalmente dos resíduos sólidos industriais, carece de um estudo que esclareça as principais barreiras que dificultam o aproveitamento de AEA, principalmente em países em desenvolvimento.

Neste contexto, a presente pesquisa busca elucidar as potencialidades e os desafios baseados em elementos políticos, normativos, físicos, econômicos e de monitoramento e controle que impactam no aproveitamento do AEA em aplicações já consolidadas. A partir disso, busca-se elaborar um diagrama de causa e efeito para representar as inter-relações entre os elementos identificados e a utilização do agregado de escória de aciaria. Cabe salientar que esta pesquisa tem como foco as aplicações já consolidadas, nas quais o AEA já tenha sido exposto ao ar livre e passado pelo processo de estabilização química promovida pelo intemperismo natural.

## 2 Metodologia

A metodologia empregada nesta pesquisa consiste em duas etapas: revisão sistematizada da literatura e descrição das relações de causalidades entre os elementos identificados e o aproveitamento do AEA.

### 2.1 Etapa 1 - Revisão sistematizada da literatura

A etapa de revisão sistematizada da literatura seguiu os seguintes passos: (1) planejamento da revisão: estabelecer as perguntas de pesquisa a serem respondidas, termos de busca e bases 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 sumarizada.

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 é o tipo de influência destes elementos no aproveitamento do AEA em aplicações consolidadas, de forma a fomentar sistemas de apoio à decisão?” Para responder a essas perguntas, a revisão sistematizada da literatura considerou dados extraídos dos portais 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. Para esta pesquisa foram considerados os termos de busca apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Termos de busca utilizados na pesquisa sistematizada da literatura

Termos de busca		Base de dados
Português	Inglês	
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; reúso; reciclagem.	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.	Web of Science, Scopus, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e SciELO. Relatórios, bancos de dados públicos e publicações seriadas de instituições ligadas ao setor siderúrgico
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.	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	
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; reúso; recursos; conservação; geração; exploração; resíduos industriais; resíduos; propriedades; manufatura.	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.	Web of Science, Scopus, BDTD e SciELO.

A pesquisa em artigos 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 [25]. A ferramenta possibilitou a identificação de 7.968 artigos nas bases de dados. Tais artigos foram exportados para uma planilha no software Excel para compor o portfólio inicial. Posteriormente, foram realizados os procedimentos de filtragem com retirada da duplicidade, leitura de termos de busca, títulos e resumos, resultando em 2.401 artigos.

Por fim, o critério de exclusão 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. No software, os artigos foram agrupados em pastas organizadas conforme os elementos que influenciam o aproveitamento do AEA, como elementos políticos e normativos, econômicos, operacionais, físicos, dentre outros. A leitura dos artigos também foi realizada no próprio software, uma vez que, ele possibilita a inserção de comentários e destaques de trechos importantes do artigo. Após isso, foi apresentada a análise dos resultados, seguida das discussões, com o intuito de alcançar as respostas das perguntas de pesquisa originais.

## 2.2 Etapa 2 - Descrição das relações de causalidades entre os elementos e o aproveitamento do AEA

A partir da etapa anterior foi possível correlacionar os elementos identificados na literatura que influenciam no aproveitamento do AEA, bem como no envio de AEA para aterro industrial. Para a representação das inter-relações entre os elementos identificados, foi elaborado um diagrama de causa e efeito (DCE) utilizando o software Vensim PLE® [26]. O DCE é uma ferramenta visual utilizada para demonstrar a interdependência dos componentes em um sistema, incluindo relações causais diretas e indiretas [27]. Tais 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 [28]. 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 [29].

Os links entre as variáveis, descritos pelas setas, indicam a polaridade causal de uma variável em outra e carregam um sinal (+ ou -). O sinal positivo indica que uma determinada variável tem efeito diretamente proporcional em outra variável, enquanto o sinal negativo indica um efeito inversamente proporcional. Pode-se dizer também que nas relações positivas, o aumento em uma variável X

causará também um aumento na variável Y, ao passo que a redução na variável X causará uma redução na variável Y. Já nas relações negativas, o aumento da variável X reduzirá Y, enquanto a redução da variável X causará aumento da Y [29].

Já os loops são fontes de estabilidade e resistência à mudança, ou seja, geram um comportamento de equilíbrio [30]. 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 [28]. A função do loop negativo é neutralizar o sistema. Isso significa que há uma tendência de estabilidade/equilíbrio no sistema, ao passo que no loop positivo a tendência é um crescimento

exponencial, ou seja, ocorre uma amplificação ou reforço da condição inicial [29]. Já os delays, representados por dois traços no DCE, são atrasos no efeito de uma variável sobre outra. Os atrasos são os grandes responsáveis por grande parte dos sistemas complexos, uma vez que, geram comportamentos inesperados, oscilações de amplificações [31].

### 3 Resultados e discussão

A partir da pesquisa sistematizada da literatura, identificou-se as principais potencialidades e os desafios (Tabela 2) baseados em elementos políticos no aproveitamento do AEA.

**Tabela 2.** Potencialidades e desafios para o aproveitamento de AEA com base nos principais elementos políticos identificados na literatura

Elementos	Potencialidades	Referências
Elementos políticos e normativos	Lei Tributária de Proteção Ambiental na China	[3,32]
	Lei se referindo a escória de ferro ou aço como um item de valor nos Estados Unidos	Wisconsin Act 285 [33]
	Lei de promoção para aquisição de bens e serviços ecológicos no Japão	[34]
	Lei Fundamental do Ciclo de Vida dos Materiais no Japão	[35]
	Política Nacional do Aço na Índia	[12]
	Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil	[36]
	Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Espírito Santo PERS-ES	[37]
	Diretiva do Parlamento Europeu sobre Resíduos de 2018	DE: 2018/851 e [38]
	Normas técnicas regulamentadoras no Brasil	[39]
	Declaração ambiental, protocolo de qualidade, selo verde, rótulo ecológico, sistema de avaliação ambiental e certificações ambientais.	[17,24,40,41]
	Plano Diretor Resíduo Zero	[42]
	Incentivo legal para processos com menores emissões de carbono	[43]
	Imposição legal de sobretaxas para mineração de matérias-primas virgens e para aterros industriais de resíduos industriais	[44]
Elementos econômicos	Subsídios econômicos e isenção de taxas para o reaproveitamento de escória como AS	[16,32,45-49]
	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	[50]
	Crescimento na construção de rodovias	[12,51]
Elementos	Desafios	Referências
Elementos políticos e normativos	Leis e outros atos normativos com restrição do uso de AEA em algumas aplicações na China	[16,24,52]
	Inexistência de diretrizes internacionais padronizadas para normatização da qualidade das escórias como AS	
	Controle fiscal	[46]
Elementos econômicos	Incentivo a redução da compra de matérias virgens e do consumo de NA	[16,32,45-49]
	Custos Logísticos	[12]
	Preço do AN	[46,49]
Elementos físicos	Esgotamento de recursos de AN	[12,51]
Elementos operacionais	Parâmetros de controle	[7,14,15]
	Disponibilidade de dados confiáveis	[19]

AE: agregado de escória de aciaria; AN = agregado natural; AS = agregado siderúrgico.



A pesquisa também possibilitou a proposição de um DCE para ilustrar as relações de causalidade entre os elementos identificados e o aproveitamento do AEA. O DCE, apresentado na Figura 1, foi elaborado por meio do software Vensim PLE® [22], com as variáveis de interesse estão representadas na cor preta e os elementos políticos e normativos na cor cinza. Já os elementos econômicos são representados na cor marrom e os elementos físicos e operacionais nas cores azul e verde, respectivamente. Em lilás, as partes interessadas que afetam ou são afetadas de alguma forma pela geração do AEA, como instituições, investidores, grupos, pessoas, empresas, dentre outros. O controle fiscal foi enfatizado separadamente, em vermelho no DCE e corresponde às atividades da administração pública e de seus agentes visando cumprir as obrigações legais da sociedade.

Os elementos políticos e normativos, em sua grande maioria, influenciam direta e positivamente no aproveitamento do AEA. Uma pequena parte, como leis e atos restringindo o uso, inexistência de diretrizes para uso e incertezas geradas pelas leis, acabam favorecendo o envio para aterro [16,17,23,52]. Já o controle fiscal, que é uma estratégia eficaz para conduzir a práticas sustentáveis [53], pode ter influência negativa na geração, devido principalmente a parâmetros de controle fora dos limites legais, como o pH, e a não disponibilidade de dados confiáveis. Caso os parâmetros estejam disponíveis e sejam confiáveis (e o mais importante estejam dentro dos limites legais para a aplicação), isso influencia direta e positivamente no aproveitamento do AEA e no desvio para aterro industrial [54].

O elemento partes interessadas é representado principalmente por clientes de resíduos e acaba influenciando

direta e positivamente no aproveitamento do AEA [19]. 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 [55], 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 [12,51].

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 [16,32,45-49] influenciam positivamente no aproveitamento do AEA, bem como o maior preço do AN influi positivamente no aproveitamento do AEA [49,53]. Em contrapartida, os incentivos são inversamente proporcionais ao envio de AEA para o aterro sanitário, uma vez que a implementação desses incentivos reduz o envio para aterro industrial.

Já os custos logísticos excessivos influenciam negativamente tanto no aproveitamento quanto no envio para aterro [12], o que pode acarretar maior estoque interno nas empresas. Quanto aos elementos operacionais tem-se os parâmetros de controle, como os de qualidade do AEA [7,14,15] e a disponibilidade de dados confiáveis. Caso os parâmetros estejam fora dos limites legais para aplicação, por exemplo, podem influenciar positivamente no envio para aterro e negativamente na geração. A disponibilidade de dados confiáveis pode influenciar no aproveitamento; caso contrário, influencia no envio para aterro [19].

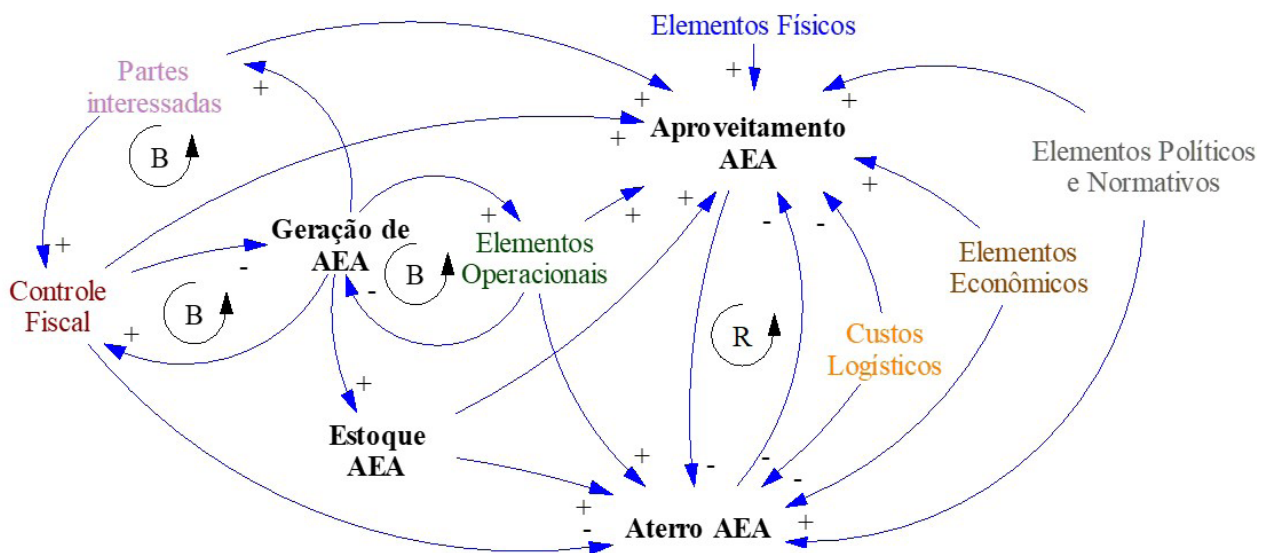


Figura 1. Relações de causalidade entre os elementos identificados e o aproveitamento do AEA.

O DCE possui ainda quatro Loops de Feedback, três loops negativos (balanceamento) e um loop positivo (reforço). Estes loops são apresentados individualmente na Figura 2.

O Loop 1 de balanço (Figura 2a) é representado pela relação entre a variável geração de AEA e os elementos partes interessadas e controle fiscal. A demanda pelas partes interessadas aumenta se aumentar a geração de AEA e, conseqüentemente, pode aumentar a demanda por outras partes interessadas como instituições, investidores, grupos, pessoas etc. Isso, por sua vez, aumenta o controle fiscal, podendo reduzir a geração.

O Loop 2 de balanço (Figura 2b) é representado pela relação direta entre a variável geração de AEA e o controle fiscal. O aumento da produção de aço gera também um aumento da geração de resíduos e, conseqüentemente, aumenta a demanda por um maior controle fiscal que, por sua vez, pode reduzir a geração de resíduos.

O Loop 3 de balanço (Figura 2c) é representado pela relação direta entre a variável geração de AEA e os elementos operacionais. O aumento da geração causará um aumento também na demanda por um maior controle dos elementos operacionais, que por sua vez, podem reduzir a geração.

O Loop 4 de reforço (Figura 2d) é representado pela relação entre as variáveis aproveitamento e aterro: quando se aumenta o aproveitamento, reduz-se o envio para aterro; reduzindo o envio para aterro, aumenta-se também a quantidade de AEA enviada para aproveitamento.

### 3.1 Elementos políticos e normativos

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 [40]. Ajayi et al. [53] afirmam que a legislação e o controle fiscal são estratégias eficazes para a condução de 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 [54]. Para o sucesso da reciclagem dos AEA, as políticas públicas precisam estar de acordo com o princípio da economia circular, que visa à reciclagem e as reduções no consumo e em desperdícios [43].

A título de exemplo, 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, antes consideradas apenas como resíduos sólidos, para um material de alto valor agregado [33]. Uma iniciativa semelhante foi implementada na Diretiva Europeia 2018/851/CE [38]. No Japão, muitos instrumentos legais, como a Lei de Promoção para Aquisição de Bens e Serviços Ecológicos pelo Estado e a Lei de Compras Verdes, tiveram papel crucial para o aproveitamento dos agregados siderúrgicos, uma vez que direcionam avaliações do desempenho ambiental de produtos produzidos [34].

A Política Indiana do Aço é um outro exemplo, que tem o intuito de promover o crescimento e o desenvolvimento sustentável mais rápido da indústria siderúrgica no país [12]. Na Inglaterra, os AEA receberam um protocolo de qualidade [56], sendo considerados totalmente recuperáveis e não mais sujeitos aos controles como resíduos sólidos. Para tanto, esses agregados precisam atender a determinadas condições, como: serem utilizados apenas os materiais previstos e produzidos a partir dos materiais autorizados; atenderem a especificações técnicas de qualidade ambiental europeias; terem um manual de controle de produção, dentre outras condições [54].

O reconhecimento legal do AEA como fonte alternativa de matéria-prima influencia positivamente, pois favorece o equilíbrio ambiental, minimizando os possíveis impactos e evitando maiores consumos de matérias-primas naturais. Outro exemplo da influência positiva da imposição de critérios legais é a adoção de elementos normativos em alguns governos para exigirem a elaboração e implementação de

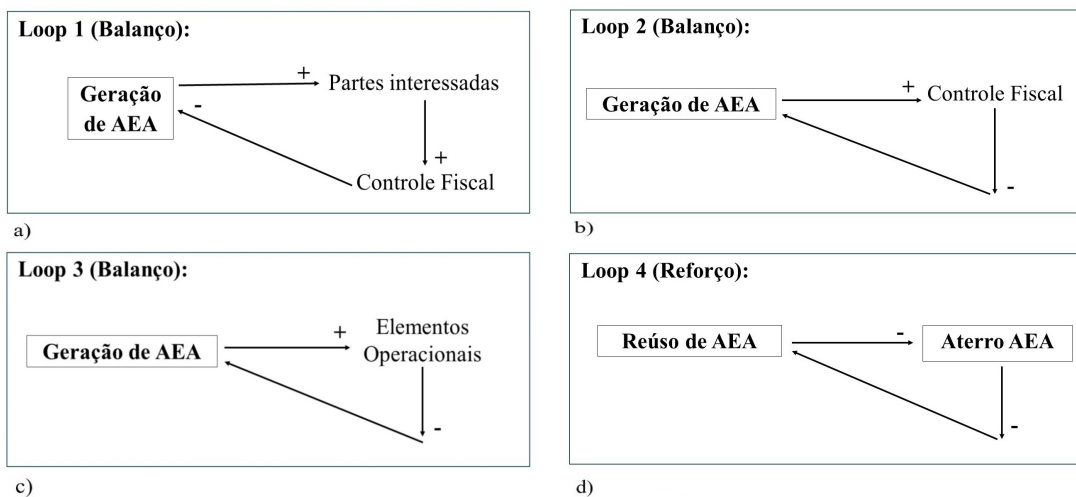


Figura 2. Representação individual dos Loops de Feedback presentes do diagrama de causa e efeito elaborado

ferramentas de aprimoramento de gestão, como os Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos [36]. No Brasil, por exemplo, a valorização do reaproveitamento de resíduos sólidos municipais e industriais está expressa na 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 [36]. O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Espírito Santo no Brasil, é um exemplo de estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços e incentivo à indústria da reciclagem [37].

O incentivo legal para processos com menores emissões de carbono também é um bom exemplo [43], além da imposição legal de sobretaxas para mineração de matérias-primas virgens e para aterros industriais de resíduos industriais [44]. 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, também a geração de escória [12]. O GoI está incentivando a indústria siderúrgica a estruturar um novo PGRS para gerenciar os subprodutos do aço, como a escória de aço, com o intuito adicional de impulsionar a reciclagem desses resíduos [12]. Todos esses atos políticos e normativos (descritos em cinza no DCE) influenciam positivamente a utilização do AEA.

Contudo, a ausência de critérios legais ainda tem se demonstrado como uma das barreiras mais difíceis de serem superadas no caso dos AEA. Trata-se de lacunas na legislação existente, de imposições com critérios pertinentes e adequados, ou atos políticos e normativos muito restritivos, com ausência de uma padronização e diretrizes em nível mundial. As influências negativas, identificadas no Tabela 1 e no DCE (Figura 1), como atos políticos e normativos, restringem o uso de AEA em obras estruturais e não estruturais com aplicações consolidadas. Além disso, a ausência de leis incentivando o uso se torna um custo de oportunidade, ou seja, inviabiliza uma vantagem competitiva econômica, ambiental e técnica, da qual um AN concorrente pode se apoderar.

Essas barreiras legais impactam negativamente nos resultados econômicos do negócio e na escassez de recursos naturais devido ao menor favorecimento do uso de agregados, além de causarem o impedimento e insegurança jurídica para a realização de atividades sustentáveis. Embora existam diversas normas vigentes que regulamentam atividades ligadas aos resíduos sólidos em termos mundiais, deve-se ainda melhorar a integração, estruturação, independência técnica e funcional dos órgãos de controle ambiental para que as normas e exigências legais tenham efeito positivo e duradouro na redução dos impactos ambientais e no fomento do reúso e reciclagem.

O Brasil, por exemplo, publicou diversas normas, dentre elas, a norma técnica para a classificação de resíduos sólidos, que têm classificado a EA como resíduo não perigoso

e inerte [39], normas para emprego dos agregados (naturais ou siderúrgicos) na construção civil (NBR 52/2003, 53/2003 e 721/2005) e para Pavimentação Rodoviária (NBR 16364/2015, DNIT 406 e 407/2017). Essas 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 [54].

Já os principais elementos políticos e normativos como protocolos, selos verdes, rótulos ecológicos, certificações e declarações ambientais são importantes para identificar as semelhanças e as desigualdades no que tange à qualidade ambiental para os diferentes usos. Além disso, são importantes para se apresentar possíveis impactos ambientais e as formas de evitá-los ou identificar vulnerabilidades ambientais entre diferentes aplicações. 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 [41]. Contudo, Ghosh et al. [23] e Lee et al. [17] mencionam que há uma necessidade urgente de diretrizes ambientais padronizadas em nível mundial para o aproveitamento pleno dos resíduos siderúrgicos. Os protocolos ambientais empregados na gestão de resíduos sólidos da indústria siderúrgica são desenvolvidos não apenas para a utilização lucrativa desses resíduos na fabricação de produtos convencionais, mas também para a conversão destes em produtos totalmente novos [24]. Dentre as barreiras apontadas, Minkov et al. [41] 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”.

A prevenção de resíduos deve ser a ação preferencial na gestão de resíduos sólidos. Contudo, ao contrário do princípio da hierarquia de gestão de resíduos, princípio este presente em diversos instrumentos legais de gestão de resíduos sólidos em países da Europa, Brasil dentre outros, grande parte das políticas engloba o incentivo ao reúso e à reciclagem. Contudo, a prevenção de resíduos deve ser a ação mais preferencial. 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 [57]. No entanto, a reciclagem é limitada em alguns aspectos, 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 por meio de atos políticos e normativos que favoreçam o maior aproveitamento, pois grandes quantidades ainda estão sendo destinadas a aterros [54].

### 3.2 Elementos econômicos

Subsídios, cobrança de taxas/tarifas e desoneração de impostos são elementos econômicos eficazes na criação de

oportunidades para a redução, reciclagem e/ou reutilização de AEA. O subsídio econômico é uma abordagem comum para promover o desenvolvimento da indústria, principalmente a de reciclagem. Di Filippo et al. [47], Dutra et al. [58] e Liu et al. [32] mencionam que os incentivos econômicos podem ser aplicados na forma de créditos fiscais, isenção de impostos, assistência a empréstimos e abatimentos ou concessões. Tais instrumentos influenciam positivamente no aproveitamento do AEA, atraindo empresas de beneficiamento, favorecendo a aquisição de equipamentos, a logística de transporte a locais distantes e a atração, capacitação e contratação de mão de obra.

A melhoria da taxa de utilização do AEA 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 [16]. Para Gálvez-Martos et al. [59], se as barreiras existentes forem rompidas na comercialização, mercado de materiais virgens e logística é possível aumentar a reciclagem de resíduos de agregado a taxas próximas de 100%. O governo japonês, por exemplo, oferece subsídios por meio de incentivos fiscais, créditos financeiros e empréstimos bonificados para empresas que reciclam, por exemplo, agregados reciclados, com empréstimos a juros baixos para consumidores que compram produtos reciclados [60,61]. Outras iniciativas semelhantes são implementadas por países como Singapura [60,61], China [32] e pelo estado do Amapá [62].

Contudo, cabe mencionar que alguns elementos econômicos trazem benefícios e outros podem refletir em aumento de gastos, como cobrança de taxas/tarifas e impostos. Para Liu et al. [32], por exemplo, 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. Os impostos ambientais desempenham um papel limitado em regiões de alta regulamentação ambiental, além de terem poucos efeitos sobre as grandes empresas que são estatais.

Há também elementos econômicos que influenciam no aproveitamento de AEA de forma indireta, por exemplo, 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 [49,53]. A aplicação de sobretaxas sobre a destinação para aterros e sobre a oneração do uso de AN é utilizada em diversos países para incentivar a utilização de agregados reciclados [63]. Países como Dinamarca e Suécia conseguiram promover o uso de agregados reciclados e incentivaram a taxa de reciclagem e o aproveitamento com a aplicação dos impostos sobre os NA [64].

Os processos interconectados para aplicações consolidadas de AEA deveriam ser incentivados também pelo poder público com o uso de elementos econômicos. A associação entre indústrias pode trazer redução de custos e vantagens competitivas, além de redução dos riscos ambientais. Empresas e governos, por exemplo, podem formar uma

simbiose, uma rede colaborativa, para sustentabilidade e desperdício zero e tornar uma matéria-prima ou insumo para um aquilo que seria apenas um resíduo para outro. 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 [55].

### 3.3 Elementos físicos e operacionais

Os elementos físicos e operacionais são muitos importantes, embora sejam os menos citados na literatura. Em relação aos elementos físicos, o mais citado na literatura foi o esgotamento de recursos de AN [12,51], favorecendo e alertando para o uso do AEA e outros agregados alternativos. Quanto aos elementos operacionais, os citados foram parâmetros de controle [7,14,15] e a disponibilidade de dados confiáveis [19]. 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 EA [14], por ser um fator limitante na reutilização direta sem beneficiamento adequado.

## 4 Conclusão

Este artigo apresenta um levantamento das potencialidades e desafios para o aproveitamento de AEA em países em desenvolvimento. Para isso, realizou-se uma pesquisa sistematizada da literatura acompanhada da confecção de um modelo mental a fim de representar as inter-relações entre os elementos que influenciam no aproveitamento do AEA. Observou-se grande preocupação e esforços de pesquisadores para buscar novas alternativas 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. Nesse sentido, 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 de 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 diagrama de causa e efeito.

Observou-se, também, que países em desenvolvimento como China, Rússia, Brasil e Índia, enfrentam muitos desafios para implementar políticas ambientais devido principalmente à incapacidade de seus governos de fixarem prioridades para os diversos problemas e intervenções. Diante disso, pesquisas sobre a influência desses 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 prioritariamente incentivem o aproveitamento do agregado de forma que não se torne um empecilho para o fortalecimento da reciclagem. Nesse sentido, elementos políticos e normativos são preferidos em relação aos demais elementos econômicos, físicos e operacionais e possuem maiores peso e influência, que geralmente é positiva em relação aos demais.

Diante disso, pesquisas futuras devem se pautar na demonstração da real opinião do público-alvo, realizando comparações entre os pares, onde indivíduos de cada grupo do público-alvo do universo a ser pesquisado possibilitará

consolidar esta análise quanto aos elementos. Uma sugestão é a aplicação de um questionário direcionado aos principais grupos de stakeholders envolvidos com a temática, como órgãos públicos, entidades de classe que possuam relação com o tema e empresas do setor siderúrgico. Isso possibilitará uma avaliação mais detalhada do grau de influência em cada eixo estudado. Por fim, espera-se que este trabalho contribua com futuras pesquisas e auxilie 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

- 1 Kim JH, Bae SH, Choi SJ. Effect of amorphous metallic fibers on strength and drying shrinkage of mortars with steel slag aggregate. *Materials (Basel)*. 2021;14(18):5403.
- 2 Martins ACP, Franco de Carvalho JM, Costa LCB, Andrade HD, de Melo TV, Ribeiro JCL, et al. Steel slags in cement-based composites: an ultimate review on characterization, applications and performance. *Construction & Building Materials*. 2021;291:123265.
- 3 Zhang X, Chen J, Jiang JJ, Li J, Tyagi RD, Surampalli RY. The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2019;42(5):1321-1334.
- 4 Costa LCB, Nogueira MA, Andrade HD, Carvalho JMF, Elói PPF, Brigolini GJ, et al. Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures. *Construction & Building Materials*. 2022;318:126152.
- 5 Cui P, Wu S, Xiao Y, Hu R, Yang T. Environmental performance and functional analysis of chip seals with recycled basic oxygen furnace slag as aggregate. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;405:124441.
- 6 Fisher LV, Barron AR. The recycling and reuse of steelmaking slags — A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;146:244-255.
- 7 Dai S, Zhu H, Zhai M, Wu Q, Yin Z, Qian H, et al. Stability of steel slag as fine aggregate and its application in 3D printing materials. *Construction & Building Materials*. 2021;299:123938.
- 8 Nunes VA, Borges PHR. Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials. *Construction & Building Materials*. 2021;281:122605.
- 9 Díaz-Piloneta M, Ortega-Fernández F, Terrados-Cristos M, Álvarez-Cabal JVI. Application of Steel Slag for Degraded Land Remediation. *Land*. 2022;11:224.
- 10 Olofinnade O, Morawo A, Okedairo O, Kim B. Solid waste management in developing countries: reusing of steel slag aggregate in eco-friendly interlocking concrete paving blocks production. *Case Stud Constr Mater*. 2021;14:e00532.
- 11 Sharba AA. The efficiency of steel slag and recycled concrete aggregate on the strength properties of concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019;23(11):4846-4851.
- 12 Swathi M, Andiyappan T, Guduru G, Amarnatha Reddy M, Kuna KK. Design of asphalt mixes with steel slag aggregates using the Bailey method of gradation selection. *Construction & Building Materials*. 2021;279:122426.
- 13 Habibi F, Asadi E, Sadjadi SJ, Barzinpour F. A multi-objective robust optimization model for site-selection and capacity allocation of municipal solid waste facilities: a case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*. 2017;166:816-834.
- 14 Mendonça RL, Rodrigues GLC. Uso adequado da escória de aciaria. [Internet]. *Pavimentação em foco*; 2022 [acesso em 10 out. 2023]. Disponível em: <https://pavimentacaoemfoco.blogspot.com/search/label/Artigos>
- 15 Fu Q, Xue G, Xu S, Li J, Dong W. Mechanical performance, microstructure, and damage model of concrete containing steel slag aggregate. *Structural Concrete*. 2023;24(2):2189-2207. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202200350>.
- 16 Guo J, Bao Y, Wang M. Steel slag in China: treatment, recycling, and management. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2018;78:318-330.

- 17 Lee MY, Kang JH, Hwang DG, Yoon Y-S, Yoo M-S, Jeon T-W. Environmental assessment of recycling (EAoR) for safe recycling of steelmaking slag in the republic of Korea: applications, leaching test, and toxicity. *Sustainability (Basel)*. 2021;13(16):8805.
- 18 Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade da indústria brasileira do aço – 2021 [Internet]. Instituto Aço Brasil; 2021 [acesso em 16 out. 2023]. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/indicadores-de-sustentabilidade/>
- 19 Perteghella A, Gilioli G, Tudor T, Vaccari M. Utilizing an integrated assessment scheme for sustainable waste management in low and middle-income countries: case studies from Bosnia-Herzegovina and Mozambique. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2020;113:176-185.
- 20 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211 Agregado para concreto – Especificação [Internet]. Rio de Janeiro: ABNT; 2022 [acesso em 10 out. 2023]. Disponível em: <https://www.normas.com.br/autorizar/visualizacao-nbr/238/identificar/visitante>
- 21 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 52 - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente [Internet]. Rio de Janeiro: ABNT; 2003 [acesso em 10 out. 2023]. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/36130/nbrnm52-agregado-miudo-determinacao-de-massa-especifica-e-massa-especifica-aparente>
- 22 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. [Internet]. Rio de Janeiro: ABNT; 2009 [acesso em 10 out. 2023]. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/13063/abnt-nbr16917-agregado-graudo-determinacao-da-densidade-e-da-absorcao-de-agua>
- 23 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*. 2020;290(1-2):491-520.
- 24 Ghosh A, Ghosh AK. Solid waste management in steel industry—challenges and opportunities. In: *Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies: 7th IconSWM—ISWMAW 2017*; Singapore. Singapore: Springer; 2017. Vol. 1, pp. 299-307.
- 25 Pessin VZ, Yamane LH, Siman RR. Smart bibliometrics: an integrated method of science mapping and bibliometric analysis. *Scientometrics*. 2022;127(6):3695-3718.
- 26 Ventana Systems. Vensim. UK: Ventana Systems; 2021.
- 27 Ryan E, Pepper M, Munoz A. Causal loop diagram aggregation towards model completeness. *Systemic Practice and Action Research*. 2021;34(1):37-51.
- 28 Sterman JD. *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. USA: McGraw-Hill Companies, Inc.; 2000.
- 29 Morecroft JDW. *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. 2nd ed. Chichester: Wiley; 2015.
- 30 Pruyt E. *Small system dynamics models for big issues: triple jump towards real-world complexity*. Delft: TU Delft Library; 2013.
- 31 Sena LG, Calixto LM, Galavote T, Chaves GLD, Siman RR. Gestão de resíduos domiciliares: uma análise sistêmica sob a ótica da sustentabilidade financeira de municípios e rendimentos de catadores de materiais recicláveis no Brasil. *urbe. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*. 2023;15:e20220212.
- 32 Liu G, Yang Z, Zhang F, Zhang N. Environmental tax reform and environmental investment: a quasi-natural experiment based on China’s Environmental Protection Tax Law. *Energy Economics*. 2022;109:106000.
- 33 Wisconsin. 2021 Wisconsin Statutes & Annotations. USA: Justia Legal Resources; 2021. Chapter 285 - Air pollution. Disponível em: <https://law.justia.com/codes/wisconsin/2021/chapter-285/>. Acesso em: 10 de out. 2023
- 34 Japan for Sustainability. *Japan’s Green Purchasing Law: Description and Achievements*. Japan: Japan for Sustainability; 2003.
- 35 Japan. *Fundamental law for establishing a sound material-cycle society*. Japan: Environment Agency Japan; 2000.
- 36 Brasil. Lei nº 12.305 de 02 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. 2010.
- 37 Espírito Santo. *Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo*. Vitória: SEAMA; 2019.
- 38 European Parliament and of the Council. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Strasbourg: King’s Printer of Acts of Parliament; 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>

- 39 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação [Internet]. Rio de Janeiro: ABNT; 2004 [acesso em 16 out. 2023]. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=T0pJNTgyRndVYVc5WWFMB3RYU2xvaFZxaFFNMIZJZIY=>
- 40 Li J, Yao Y, Zuo J, Li J. Key policies to the development of construction and demolition waste recycling industry in China. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2020;108:137-143.
- 41 Minkov N, Schneider L, Lehmann A, Finkbeiner M. Type III Environmental Declaration Programmes and harmonization of product category rules: status quo and practical challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2015;94:235-246.
- 42 Singapore. Zero Waste Masterplan [Internet]. Singapore: Zero Waste; 2023 [acesso em 16 out. 2023]. Disponível em: <https://www.towardszerowaste.gov.sg/zero-waste-masterplan/>
- 43 Freitas SMAC, Sousa LN, Diniz P, Martins ME, Assis PS. Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2018;20(5):1087-1095.
- 44 Mhatre P, Gedam VV, Unnikrishnan S. Material circularity potential for construction materials – The case of transportation infrastructure in India. *Resources Policy*. 2021;74:102446.
- 45 Machado CM Jr, Martinez IVAL, Silva OR, Bazanini R. Social and Environmental Innovations in Brazilian Siderurgy. *Rev Adm IMED*. 2020;10(2):140-157.
- 46 Ajayi SO, Oyedele LO, Bilal M, Akinade OO, Alaka HA, Owolabi HA, et al. Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements. *Resources, Conservation and Recycling*. 2015;102:101-112.
- 47 Di Filippo J, Karpman J, DeShazo JR. The impacts of policies to reduce CO2 emissions within the concrete supply chain. *Cement and Concrete Composites*. 2019;101:67-82.
- 48 Kang L, Du HL, Zhang H, Ma WL. Systematic research on the application of steel slag resources under the background of big data. *Complexity*. 2018;2018:6703908.
- 49 Ghaffar SH, Burman M, Braimah N. Pathways to circular construction: an integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of Cleaner Production*. 2020;244:118710.
- 50 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 (New York, N.Y.)*. 2020;105:268-278.
- 51 Goli A. The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt. *Case Stud Constr Mater*. 2022;16:e00861.
- 52 Dondi G, Mazzotta F, Lantieri C, Cuppi F, Vignali V, Sangiovanni C. Use of Steel Slag as an Alternative to Aggregate and Filler in Road Pavements. *Materials (Basel)*. 2021;14(2):345.
- 53 Ajayi SO, Oyedele LO. Policy imperatives for diverting construction waste from landfill: Experts' recommendations for UK policy expansion. *Journal of Cleaner Production*. 2017;147:57-65.
- 54 Abreu LD. Potencialidades e desafios para o aproveitamento de agregado siderúrgico de escória de aciaria em países em desenvolvimento: uma revisão sistematizada da literatura [dissertação]. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo; 2023 [acesso em 4 dez. 2023]. Disponível em: <https://engenhariaambiental.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGEA/detalhes-da-tese?id=17379>
- 55 Di Maria A, Salman M, Dubois M, Van Acker K. Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018;23(11):2091-2109.
- 56 United Kingdom. Aggregate from waste steel slag: quality protocol. UK: GOV.UK; 2016.
- 57 Luo Q, Grossule V, Lavagnolo MC. Washing of residues from the circular economy prior to sustainable landfill: Effects on long-term impacts. *Waste Management & Research*. 2023;41(3):585-593.
- 58 Dutra RMS, Yamane LH, Siman RR. Influence of the expansion of the selective collection in the sorting infrastructure of waste pickers' organizations: a case study of 16 Brazilian cities. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2018;77:50-58.
- 59 Gálvez-Martos JL, Styles D, Schoenberger H, Zeschmar-Lahl B. Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;136:166-178.
- 60 Li J, Zuo J, Guo H, He G, Liu H. Willingness to pay for higher construction waste landfill charge: a comparative study in Shenzhen and Qingdao, China. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2018;81:226-233.

- 61 Ho P. Greening industries in newly industrializing economies [Internet]. New York: Routledge; 2016 [acesso em 16 out. 2023]. Disponível em: <https://www.routledge.com/Greening-Industries-in-Newly-Industrializing-Economies/Ho/p/book/9781138975507>
- 62 Amapá. TESOURO VERDE: Programa voltado para o desenvolvimento econômico sustentável no Estado do Amapá. Amapá: Disponível em: <http://www.tesouroverde.ap.gov.br/>. Acesso em: 15 de out. 2023; 2023.
- 63 Cadoret I, Galli E, Padovano F. How do governments actually use environmental taxes? *Applied Economics*. 2020;52(48):5263-5281.
- 64 Söderholm P. Taxing virgin natural resources: lessons from aggregates taxation in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011;55(11):911-922.

Recebido em: 4 Dez. 2023

Aceito em: 6 Mar. 2024