



AGS-LET COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL PARA GESTÃO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS E DE SANEAMENTO

AGS-LET AS A SUSTAINABLE STRATEGY FOR STEEL AND SANITATION WASTE MANAGEMENT

AGS-LET COMO ESTRATEGIA SOSTENIBLE PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS Y DE SANEAMIENTO

DOI: 10.5281/zenodo.20672332



Ana Paula de Oliveira da Silva¹

Paulo Santos Assis²

RESUMO

A crescente geração de resíduos industriais e de saneamento tem ampliado os desafios relacionados à disposição ambientalmente adequada de materiais potencialmente reutilizáveis. No setor siderúrgico, a escória de aciaria LD representa um dos principais coprodutos minerais gerados durante o refino do aço, enquanto os sistemas de tratamento de água produzem grandes volumes de lama de ETA. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar o potencial da proposta AGS-LET como contribuição à gestão de resíduos no setor siderúrgico, considerando a utilização integrada de agregado siderúrgico derivado da escória LD e lama de ETA em aplicações geoambientais. A metodologia baseou-se em revisão técnico-científica qualitativa, fundamentada em literatura nacional e internacional, normas técnicas, estudos geoambientais e referenciais sobre economia circular e valorização de resíduos industriais. Os resultados indicaram que a complementaridade físico-química entre os materiais favorece mecanismos de estabilização geoquímica, redução da permeabilidade, retenção de contaminantes e melhoria do desempenho ambiental de sistemas de confinamento.

1 Doutoranda em Engenharia de Materiais e Metalurgia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. E-mail: aposilva31@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6358-8669>

2 Doutor em Metalurgia, RWTH Aachen University, RWTHA, Alemanha. E-mail: assis@ufop.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0874-4162>

**Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 6 (2026) - DOSSIÊ ESPECIAL:
Conhecimento, Formação e Transformação Social**

A Revista OWL Journal está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)





Verificou-se ainda que o reaproveitamento integrado desses resíduos apresenta alinhamento com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos e com estratégias contemporâneas de sustentabilidade industrial. Conclui-se que o sistema AGS-LET constitui alternativa promissora para redução de passivos ambientais, valorização de coprodutos e fortalecimento de práticas associadas à economia circular.

Palavras-chave: Escória LD; Lama de ETA; Resíduos Siderúrgicos; Economia Circular; Engenharia Ambiental.

ABSTRACT

The increasing generation of industrial and sanitation waste has intensified challenges related to environmentally appropriate disposal of potentially reusable materials. In the steel industry, LD steel slag represents one of the main mineral by-products generated during steel refining, while water treatment systems produce large volumes of water treatment sludge. In this context, this study aimed to analyze the potential of the AGS-LET proposal as a contribution to waste management in the steel industry, considering the integrated use of steel aggregate derived from LD slag and water treatment sludge in geoenvironmental applications. The methodology was based on a qualitative technical-scientific review supported by national and international literature, technical standards, geoenvironmental studies and references related to circular economy and industrial waste valorization. The results indicated that the physicochemical complementarity between the materials favors mechanisms of geochemical stabilization, permeability reduction, contaminant retention and improvement of the environmental performance of containment systems. It was also verified that the integrated reuse of these residues is aligned with the principles of the Brazilian National Solid Waste Policy and with contemporary industrial sustainability strategies. It is concluded that the AGS-LET system represents a promising alternative for reducing environmental liabilities, valorizing by-products and strengthening practices associated with circular economy principles.

Keywords: LD Slag; Water Treatment Sludge; Steel Waste; Circular Economy; Environmental Engineering.

RESUMEN

La creciente generación de residuos industriales y de saneamiento ha intensificado los desafíos relacionados con la disposición ambientalmente adecuada de materiales potencialmente reutilizables. En el sector siderúrgico, la escoria de acería LD representa uno de los principales coprodutos minerales generados durante el refinado del acero, mientras que las Estaciones de Tratamiento de Agua producen grandes volúmenes de lodo de ETA. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar el potencial de la propuesta AGS-LET como alternativa sostenible para la gestión integrada de residuos siderúrgicos y de saneamiento en aplicaciones geoambientales. La metodología se basó en una revisión técnico-científica cualitativa fundamentada en literatura nacional e

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 6 (2026) - DOSSIÊ ESPECIAL:
Conhecimento, Formação e Transformação Social

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)





internacional, normas técnicas, estudos geoambientais y referencias relacionadas con economía circular, sostenibilidad industrial y valorización de residuos. Los resultados evidenciaron que la complementariedad fisicoquímica entre la escoria LD y el lodo de ETA favorece mecanismos de estabilización geoquímica, reducción de la permeabilidad, retención de contaminantes y mejora del desempeño ambiental del sistema. Además, se verificó que la utilización integrada de estos materiales presenta potencial para aplicaciones en coberturas ambientales, barreras hidráulicas y recuperación de áreas degradadas, contribuyendo simultáneamente para reducción de pasivos ambientales, valorización de coproductos y disminución de la demanda por agregados naturales. La propuesta AGS-LET también demostró alineamiento con los principios de economía circular y simbiosis industrial, promoviendo reinserción sostenible de residuos provenientes de diferentes cadenas productivas. Se concluye que el sistema AGS-LET constituye una alternativa prometedora para fortalecimiento de la gestión sostenible de residuos siderúrgicos y de saneamiento, presentando potencial relevante para desarrollo de soluciones innovadoras en ingeniería geoambiental.

Palabras clave: Escoria Ld; Lodo De Eta; Residuos Siderúrgicos; Economía Circular; Ingeniería Geoambiental.

1. INTRODUÇÃO

A gestão sustentável de resíduos industriais consolidou-se como um dos principais desafios ambientais associados ao desenvolvimento industrial contemporâneo. O aumento da produção global, aliado ao consumo intensivo de matérias-primas e à expansão das cadeias produtivas, ampliou significativamente os volumes de resíduos gerados por setores estratégicos da economia, especialmente aqueles relacionados à mineração, siderurgia, energia e saneamento. Nesse contexto, a busca por soluções capazes de reduzir impactos ambientais e promover reaproveitamento de materiais passou a ocupar posição central nas discussões sobre sustentabilidade industrial e economia circular.

Entre os segmentos industriais de maior relevância econômica e ambiental destaca-se a siderurgia, responsável pela produção de aço utilizado em infraestrutura, construção civil, transporte e diversos setores produtivos. Apesar da importância estratégica desse setor, o processo siderúrgico também é caracterizado pela geração de expressivos volumes de coprodutos sólidos, especialmente escórias provenientes das etapas de refino do aço. A escória de aciaria LD constitui um dos principais materiais gerados nesse processo, apresentando

**Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 6 (2026) - DOSSIÊ ESPECIAL:
Conhecimento, Formação e Transformação Social**

**A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição
(CC BY)**





elevada disponibilidade e características físico-químicas que despertam interesse crescente para aplicações em engenharia ambiental e geotécnica.

A relevância ambiental da siderurgia também está associada aos elevados volumes de coprodutos minerais gerados durante o processo produtivo. Estimativas da *World Steel Association* (2024) indicam que a produção mundial de aço supera 1,8 bilhão de toneladas anuais, resultando na geração de grandes quantidades de escórias siderúrgicas. No Brasil, a produção de aço bruto permanece entre as maiores da América Latina, ampliando os desafios relacionados à destinação ambientalmente adequada desses materiais. Nesse cenário, estratégias voltadas ao reaproveitamento de coprodutos siderúrgicos assumem importância crescente, especialmente diante das exigências contemporâneas relacionadas à sustentabilidade, descarbonização industrial e economia circular (Instituto Aço Brasil, 2025; Meshram; Kumar; Singh, 2023).

Paralelamente, os sistemas de tratamento de água também produzem resíduos em larga escala, sobretudo lamas oriundas das etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Tradicionalmente tratadas como passivos operacionais dos sistemas de saneamento, essas lamas apresentam elevada umidade, presença de partículas finas e hidróxidos metálicos, características que dificultam sua disposição final e elevam custos operacionais relacionados ao manejo.

Nas últimas décadas, a valorização de resíduos industriais e de saneamento passou a ser impulsionada por estratégias associadas à economia circular, modelo que busca reinserir materiais em novos ciclos produtivos e minimizar a geração de rejeitos. Nesse cenário, a utilização integrada de coprodutos provenientes de diferentes cadeias produtivas surge como alternativa promissora para desenvolvimento de soluções ambientais sustentáveis.

A proposta AGS-LET insere-se justamente nesse contexto, fundamentando-se na utilização conjunta de agregado siderúrgico derivado da escória de aciaria LD e lama de ETA em aplicações geoambientais. A hipótese central dessa abordagem reside na complementaridade físico-química entre os materiais, capaz de favorecer mecanismos de





estabilização geoquímica, redução da permeabilidade e retenção de contaminantes. Diante desse cenário, o presente artigo teve como objetivo analisar o potencial da proposta AGS-LET como contribuição à gestão de resíduos no setor siderúrgico, discutindo os fundamentos técnicos, ambientais e estratégicos associados ao reaproveitamento integrado desses materiais em aplicações ambientais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Gestão sustentável de resíduos siderúrgicos e economia circular

A expansão das atividades industriais nas últimas décadas intensificou significativamente a geração de resíduos sólidos em diferentes setores produtivos, especialmente na indústria siderúrgica. A produção de aço representa atividade estratégica para o desenvolvimento econômico mundial, sendo essencial para setores como construção civil, infraestrutura, transporte e manufatura. Entretanto, o processo siderúrgico também gera elevados volumes de coprodutos minerais, principalmente escórias provenientes das etapas de refino do aço, ampliando os desafios relacionados à gestão ambientalmente adequada desses materiais (World Steel Association, 2024).

Entre os principais resíduos gerados pela siderurgia destaca-se a escória de aciaria LD, caracterizada pela predominância de óxidos de cálcio, magnésio, ferro e silício em sua composição química. Esse material apresenta propriedades físico-químicas relevantes para aplicações geotécnicas e ambientais, especialmente devido à sua alcalinidade e capacidade cimentante. Segundo Piatak *et al.* (2015), as escórias siderúrgicas possuem elevado potencial para estabilização geoquímica e retenção de contaminantes em sistemas ambientais.

Historicamente, grande parte das escórias siderúrgicas foi destinada a pátios industriais e aterros convencionais, ocasionando ocupação de áreas extensas e potenciais riscos associados à lixiviação de compostos químicos. Entretanto, o avanço das pesquisas ambientais





e geotécnicas contribuiu para ampliação das possibilidades de reaproveitamento desses materiais em aplicações sustentáveis, especialmente em pavimentação, estabilização de solos e sistemas de cobertura ambiental (Masuero, 2018).

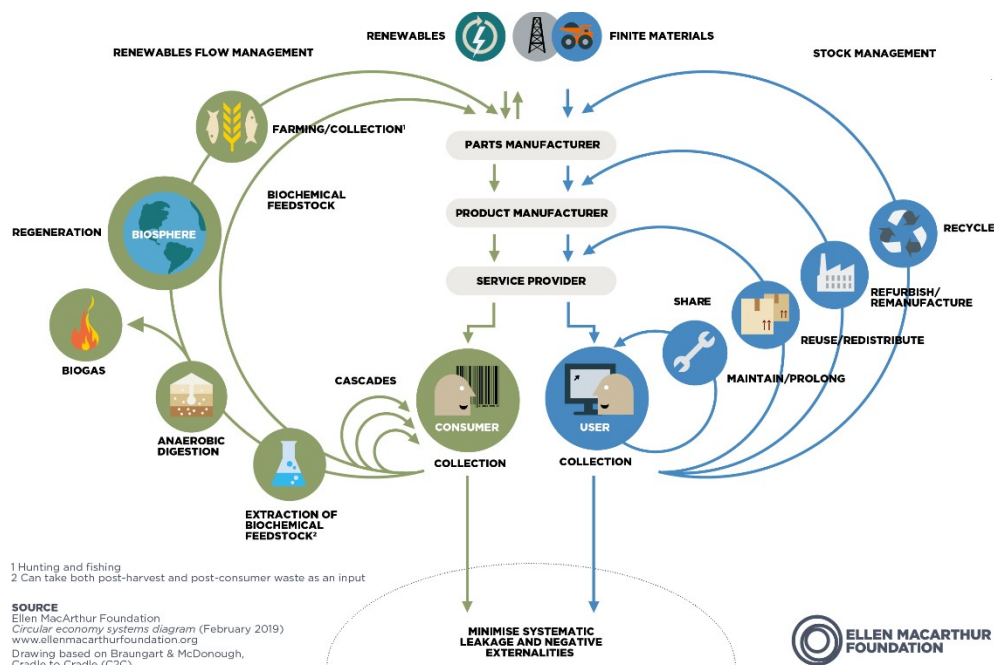
No contexto contemporâneo, a valorização de resíduos industriais tornou-se diretamente associada aos princípios da economia circular. Diferentemente do modelo linear tradicional, fundamentado na lógica de extração, consumo e descarte, a economia circular busca reinserção de materiais em novos ciclos produtivos, promovendo redução do desperdício e utilização mais eficiente dos recursos naturais (Marchi, 2018).

A compreensão dos princípios da economia circular pode ser observada por meio do modelo sistêmico proposto pela Ellen MacArthur Foundation, amplamente utilizado como referência internacional para representação dos fluxos circulares de materiais e recursos. Conforme ilustrado na Figura 1, o modelo evidencia estratégias de compartilhamento, manutenção, reutilização, remanufatura e reciclagem, permitindo que materiais anteriormente tratados como resíduos retornem aos ciclos produtivos com agregação de valor. Essa abordagem reduz a extração de recursos naturais, minimiza a geração de rejeitos e favorece o desenvolvimento de sistemas produtivos mais sustentáveis.

No contexto deste estudo, tais princípios fundamentam a proposta AGS-LET, uma vez que a utilização conjunta da escória de aciaria LD e da lama de ETA representa uma estratégia de valorização de coprodutos e reinserção de resíduos em aplicações geoambientais, alinhando-se diretamente aos conceitos de economia circular e simbiose industrial.



Figura 1. Modelo sistêmico da economia circular e dos fluxos de reaproveitamento de materiais.



Fonte: ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2019).

A aplicação da economia circular no setor siderúrgico apresenta relevância crescente diante das exigências contemporâneas relacionadas à sustentabilidade industrial e descarbonização produtiva. O reaproveitamento de coprodutos siderúrgicos reduz simultaneamente a necessidade de disposição final de resíduos e a demanda por agregados naturais, contribuindo para diminuição dos impactos ambientais associados à exploração mineral convencional (Meshram; Kumar; Singh, 2023).

A aplicação da economia circular no setor siderúrgico apresenta relevância crescente diante das exigências contemporâneas relacionadas à sustentabilidade industrial e descarbonização produtiva. O reaproveitamento de coprodutos siderúrgicos reduz simultaneamente a necessidade de disposição final de resíduos e a demanda por agregados naturais, contribuindo para diminuição dos impactos ambientais associados à exploração mineral convencional (Meshram; Kumar; Singh, 2023).



Além disso, a reutilização desses materiais favorece redução do consumo energético e das emissões indiretas de gases de efeito estufa relacionadas à extração, transporte e processamento de matérias-primas naturais. Nesse contexto, estratégias voltadas à valorização de escórias siderúrgicas vêm sendo incorporadas às políticas ambientais e industriais como mecanismos capazes de ampliar eficiência produtiva e fortalecer práticas sustentáveis. Paralelamente, a reinserção desses coprodutos em novos ciclos produtivos contribui para consolidação de modelos industriais mais circulares, eficientes e ambientalmente responsáveis.

Além dos benefícios ambientais, a reutilização de resíduos siderúrgicos também apresenta potencial econômico significativo. A utilização desses materiais em aplicações de engenharia ambiental reduz custos operacionais relacionados à disposição final industrial e aquisição de matérias-primas convencionais. Segundo Dal Molin e Masuero (2019), as escórias siderúrgicas apresentam propriedades compatíveis com diferentes aplicações construtivas e geotécnicas, desde que submetidas a adequado beneficiamento e controle granulométrico.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos fortaleceu significativamente as discussões relacionadas à valorização de resíduos industriais e reaproveitamento de coprodutos minerais. A legislação passou a priorizar práticas associadas à reutilização, reciclagem e reaproveitamento de materiais, incentivando desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas à gestão integrada de resíduos sólidos (Ribeiro, 2026).

Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de integração entre diferentes setores produtivos para desenvolvimento de soluções sustentáveis de gerenciamento de resíduos. A simbiose industrial, caracterizada pela utilização de resíduos de um setor como matéria-prima para outro processo produtivo, representa importante estratégia associada à economia circular e sustentabilidade industrial (Mont'alverne, 2025).





2.2 Lama de ETA e aplicações geoambientais

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) desempenham papel fundamental no abastecimento público e na garantia da qualidade da água distribuída à população. Entretanto, os processos de coagulação, floculação, decantação e filtração resultam na geração de grandes volumes de resíduos, especialmente lamas compostas por partículas finas, matéria orgânica e hidróxidos metálicos (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

O crescimento populacional e a ampliação dos sistemas de abastecimento público intensificaram significativamente a geração de lama de ETA nas últimas décadas. Esse cenário ampliou os desafios relacionados ao manejo, transporte, tratamento e disposição final desses resíduos, especialmente em regiões urbanas densamente povoadas (Achon; Cordeiro; Corneli, 2013).

A magnitude desse resíduo no contexto nacional pode ser observada a partir dos dados operacionais dos sistemas brasileiros de abastecimento de água. Considerando o volume anual de aproximadamente 6,7 bilhões de m³ de água tratada no Brasil (Brasil, 2025) e taxas médias de geração de lodo próximas a 0,7% do volume processado observadas em estações convencionais de tratamento de água (Silva, 2010; FAPESP, 2021), estima-se que o país produza cerca de 46,9 milhões de m³ de lama de ETA por ano. Esses números evidenciam que a lama de ETA representa um dos principais resíduos gerados pelo setor de saneamento, reforçando a importância de alternativas voltadas à sua valorização e reaproveitamento sustentável.

Do ponto de vista físico-químico, a lama de ETA apresenta características relevantes para aplicações geoambientais. O material geralmente possui elevada fração fina, grande superfície específica e presença significativa de compostos metálicos provenientes dos coagulantes utilizados no tratamento da água, especialmente hidróxidos de alumínio e ferro (Babatunde; Zhao, 2007). Essas propriedades favorecem mecanismos de adsorção, retenção química e redução da mobilidade de espécies potencialmente contaminantes em sistemas





ambientais. Além disso, a elevada quantidade de partículas finas contribui para diminuição da permeabilidade do material, característica importante para aplicações em barreiras hidráulicas, coberturas ambientais e sistemas de confinamento. Segundo Boscov (2008), materiais com comportamento coesivo e baixa condutividade hidráulica apresentam potencial significativo para utilização em obras geoambientais voltadas ao controle de fluxo e mitigação de impactos ambientais.

Essas características favorecem mecanismos de adsorção e retenção de contaminantes, além de contribuírem para redução da permeabilidade em sistemas geotécnicos. Segundo Boscov (2008), materiais com elevada fração fina e baixa permeabilidade apresentam comportamento favorável para utilização em sistemas de cobertura ambiental e barreiras hidráulicas. A presença de partículas finas e hidróxidos metálicos também amplia a capacidade de retenção hídrica e estabilização química do material, favorecendo controle da mobilidade de espécies potencialmente poluentes. Além disso, esse comportamento hidráulico contribui para diminuição da infiltração de líquidos e maior eficiência em sistemas destinados ao confinamento ambiental de resíduos. Dessa forma, a lama de ETA apresenta potencial relevante para aplicações geoambientais voltadas à mitigação de impactos ambientais e melhoria do desempenho de sistemas de engenharia.

Apesar do potencial ambiental associado à lama de ETA, sua utilização isolada em aplicações de engenharia ainda apresenta limitações importantes. A elevada umidade, baixa resistência mecânica e variabilidade composicional dificultam aplicação direta do material em sistemas geotécnicos convencionais (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017). Além disso, a presença de elevada quantidade de água no resíduo pode comprometer estabilidade estrutural, dificultando processos de compactação e controle operacional durante aplicações em campo. Outro fator relevante refere-se à heterogeneidade da composição da lama, que pode variar conforme características da água bruta e dos produtos químicos utilizados no tratamento. Nesse contexto, diversos estudos passaram a investigar a utilização integrada da lama de ETA





com materiais granulares ou cimentantes, buscando melhoria das propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas do sistema.

Além das limitações técnicas associadas às propriedades físicas e químicas do material, a destinação da lama de ETA também representa importante desafio operacional e econômico para as companhias de saneamento. De acordo com estudo desenvolvido pela Embrapa em parceria com a Sabesp, a elevada variabilidade composicional, associada aos grandes volumes produzidos e aos custos de descarte, faz com que esse resíduo seja considerado um dos principais passivos ambientais dos sistemas de tratamento de água. Segundo os pesquisadores envolvidos, a busca por alternativas tecnológicas capazes de agregar valor ao resíduo tornou-se estratégica para reduzir custos operacionais e ampliar a sustentabilidade do setor (EMBRAPA, 2023).

Nesse contexto, diversos estudos passaram a investigar alternativas associadas à mistura da lama de ETA com materiais granulares ou cimentantes, buscando melhoria do comportamento físico, hidráulico e estrutural do sistema. Segundo Babatunde e Zhao (2007), a utilização integrada de resíduos de saneamento com materiais industriais representa alternativa promissora para valorização sustentável desses resíduos.

As aplicações geoambientais envolvendo lama de ETA vêm sendo ampliadas principalmente em sistemas de cobertura de aterros, recuperação de áreas degradadas, estabilização de contaminantes e barreiras hidráulicas. Esse comportamento está associado à elevada capacidade de retenção hídrica e química apresentada pelo material (Bosco, 2008).

Sob perspectiva ambiental, o reaproveitamento da lama de ETA contribui significativamente para redução dos impactos associados à disposição final convencional desses resíduos. A valorização do material reduz a necessidade de áreas destinadas ao descarte e fortalece práticas associadas à sustentabilidade ambiental e à economia circular. Nesse contexto, iniciativas recentes desenvolvidas pela Embrapa e pela Sabesp vêm investigando o uso da lama de ETA como matéria-prima para fertilizantes de liberação controlada, demonstrando que resíduos tradicionalmente considerados passivos ambientais podem ser





transformados em produtos com valor agregado e potencial de aplicação agrícola (EMBRAPA, 2023). Tal abordagem reforça a viabilidade de estratégias voltadas à reinserção desses materiais em novos ciclos produtivos.

2.3 Interações geoambientais entre escória LD e lama de ETA

A utilização integrada de resíduos industriais e de saneamento vem sendo amplamente discutida como alternativa sustentável para desenvolvimento de materiais aplicáveis em engenharia ambiental. Nesse contexto, a associação entre escória de aciaria LD e lama de ETA apresenta elevado potencial devido à complementaridade físico-química entre os materiais (Tsugawa *et al.*, 2021).

A escória LD apresenta comportamento predominantemente granular, elevada resistência mecânica e significativa alcalinidade em função da presença de óxidos básicos em sua composição química. Essas características favorecem processos de estabilização geoquímica e precipitação química de contaminantes potencialmente móveis (Piatak *et al.*, 2015).

Por outro lado, a lama de ETA apresenta elevada fração fina, presença de hidróxidos metálicos e baixa permeabilidade, contribuindo para processos de adsorção, retenção química e controle hidráulico do sistema. Segundo Babatunde e Zhao (2007), materiais ricos em hidróxidos metálicos apresentam elevada capacidade de retenção de espécies químicas em sistemas ambientais.

A interação entre agregado siderúrgico e lama de ETA favorece desenvolvimento de compósitos geoambientais capazes de associar estabilidade estrutural e desempenho hidráulico. Enquanto a escória contribui para resistência mecânica do sistema, a lama favorece redução da permeabilidade e melhoria do comportamento geoquímico do compósito (Masuero, 2018).





Do ponto de vista geoquímico, a alcalinidade da escória LD favorece ocorrência de mecanismos de precipitação química, coprecipitação e imobilização de contaminantes. Simultaneamente, a presença de partículas finas e hidróxidos metálicos na lama de ETA potencializa processos de adsorção química e retenção de espécies potencialmente contaminantes (Piatak *et al.*, 2015).

Além dos mecanismos de precipitação e adsorção, a interação entre os materiais pode favorecer processos de carbonatação ao longo do tempo. Compostos ricos em cálcio presentes na escória reagem com dióxido de carbono atmosférico, promovendo formação de carbonatos mais estáveis e contribuindo para redução gradual da alcalinidade excessiva do sistema (Tsugawa *et al.*, 2021).

Sob perspectiva geotécnica, a combinação entre material granular e fração fina favorece comportamento hidráulico e estrutural complementar. Esse comportamento amplia o potencial de utilização do compósito em aplicações como coberturas ambientais, barreiras hidráulicas, aterros de nivelamento e recuperação de áreas degradadas (Bosco, 2008).

Além dos benefícios técnicos e ambientais, a utilização integrada de resíduos siderúrgicos e lama de ETA representa importante estratégia associada à simbiose industrial e economia circular. A reutilização simultânea de resíduos provenientes de diferentes cadeias produtivas reduz disposição final de materiais e promove desenvolvimento de soluções ambientalmente sustentáveis (Mont'alverne, 2025).

Entretanto, a consolidação dessas aplicações em escala prática ainda depende de avanços relacionados ao monitoramento de longo prazo, controle granulométrico, estabilidade geoquímica e padronização operacional dos compósitos desenvolvidos. Dessa forma, o avanço de estudos experimentais torna-se fundamental para ampliação da segurança técnica e ambiental dessas soluções (Meshram; Kumar; Singh, 2023).





3. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como estudo qualitativo, exploratório e descritivo, desenvolvido por meio de revisão técnico-científica acerca do reaproveitamento de resíduos siderúrgicos e de saneamento em aplicações geoambientais. O estudo foi estruturado a partir da análise integrada de referenciais relacionados à escória de aciaria LD, lama de ETA, economia circular, gestão sustentável de resíduos e engenharia ambiental.

Foram consultados artigos científicos nacionais e internacionais, normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), documentos institucionais, dissertações, teses e publicações relacionadas à valorização de coprodutos industriais. A seleção do material bibliográfico considerou relevância temática, atualidade e aderência ao objeto investigado.

A metodologia foi organizada em três etapas principais: levantamento bibliográfico, análise comparativa dos materiais estudados e interpretação técnico-ambiental da proposta AGS-LET. Inicialmente, realizou-se revisão sistematizada da literatura relacionada às propriedades físico-químicas da escória de aciaria LD e da lama de ETA. Posteriormente, foram analisadas as possíveis interações geoquímicas e geotécnicas associadas ao uso integrado desses materiais em aplicações ambientais.

Por fim, desenvolveu-se discussão analítica acerca do potencial da proposta AGS-LET para contribuição à gestão sustentável de resíduos no setor siderúrgico, considerando aspectos relacionados à redução da disposição final de resíduos, mitigação de impactos ambientais e fortalecimento de práticas associadas à economia circular.

3.1 Participantes

Por tratar-se de estudo de natureza bibliográfica e documental, a pesquisa não envolveu participação direta de indivíduos ou grupos humanos. Os dados analisados foram





obtidos exclusivamente a partir de fontes secundárias presentes na literatura científica e técnica.

3.2 Instrumentos/Materiais

Os principais materiais utilizados na pesquisa corresponderam a artigos científicos indexados, normas técnicas da ABNT, relatórios institucionais, publicações sobre gestão de resíduos industriais e estudos relacionados à aplicação geoambiental de coprodutos siderúrgicos. Também foram analisadas publicações nacionais e internacionais voltadas à sustentabilidade industrial, economia circular, geotecnia ambiental e reaproveitamento de resíduos em sistemas de engenharia. A seleção do material bibliográfico priorizou estudos com relevância técnico-científica, aderência temática e contribuição para compreensão das interações físico-químicas entre escória siderúrgica e lama de ETA.

Entre os principais referenciais utilizados destacam-se documentos relacionados à Política Nacional de Resíduos Sólidos, literatura sobre economia circular e estudos envolvendo caracterização físico-química da escória LD e da lama de ETA. Além disso, foram considerados trabalhos científicos relacionados aos mecanismos de estabilização geoquímica, retenção de contaminantes, comportamento hidráulico e aplicações geotécnicas de materiais alternativos em sistemas ambientais. Normas técnicas voltadas à classificação, lixiviação e solubilização de resíduos também foram utilizadas como suporte para discussão dos aspectos ambientais associados ao reaproveitamento dos materiais investigados.

3.3 Procedimentos

Os procedimentos metodológicos foram desenvolvidos em etapas sucessivas. Inicialmente, realizou-se levantamento bibliográfico em bases científicas nacionais e internacionais utilizando descritores relacionados à escória de aciaria LD, lama de ETA,





resíduos siderúrgicos, sustentabilidade industrial e engenharia geoambiental. Foram consultados artigos científicos, dissertações, teses, normas técnicas e documentos institucionais voltados à valorização de coprodutos industriais e aplicações geoambientais de materiais alternativos. A seleção dos estudos considerou relevância temática, atualidade das publicações e aderência aos objetivos propostos pela pesquisa.

Além da revisão técnico-científica, a proposta AGS-LET fundamenta-se em uma sequência operacional envolvendo etapas de seleção, caracterização, mistura, aplicação e monitoramento dos materiais utilizados. A organização dessas etapas permite compreender o processo de desenvolvimento do blend geoambiental e os procedimentos associados às análises laboratoriais realizadas ao longo do período experimental. Inicialmente, foram analisadas as propriedades físico-químicas e granulométricas da escória LD e da lama de ETA, buscando identificar potencialidades e limitações dos materiais para aplicações geoambientais. Posteriormente, foram discutidos os mecanismos de interação entre os resíduos, com ênfase nos aspectos hidráulicos, estruturais e geoquímicos relacionados à estabilização ambiental do sistema.

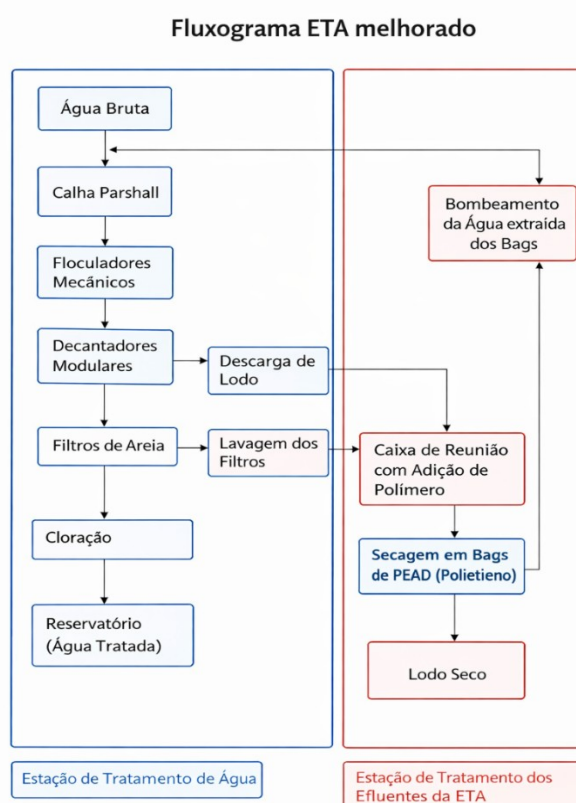
Na etapa seguinte, realizou-se interpretação analítica dos resultados disponíveis na literatura, considerando parâmetros associados à permeabilidade, estabilidade mecânica, retenção de contaminantes e potencial de reaproveitamento dos materiais em sistemas de engenharia ambiental. Também foram analisados aspectos relacionados à economia circular, simbiose industrial e redução de impactos ambientais decorrentes da disposição final convencional desses resíduos. Por fim, desenvolveu-se síntese crítica das informações obtidas, permitindo avaliação integrada acerca do potencial da proposta AGS-LET para fortalecimento da gestão sustentável de resíduos siderúrgicos e de saneamento.

Nesse contexto, a Figura 2 apresenta o fluxograma do processo de tratamento de água e das etapas de geração e tratamento da lama de ETA, destacando as operações responsáveis pela produção do resíduo utilizado na composição do sistema AGS-LET. A figura permite compreender a origem do material estudado e sua inserção em estratégias de



reaproveitamento voltadas à economia circular e à valorização de resíduos industriais e do saneamento.

Figura 2 - Fluxograma simplificado do processo de tratamento de água e das etapas de geração e tratamento da lama de ETA.



Fonte: COMPESA (2010).

Na sequência, os estudos selecionados foram submetidos à análise interpretativa, buscando identificar propriedades, aplicações e limitações associadas aos materiais investigados. Foram analisadas informações relacionadas à composição físico-química, comportamento hidráulico, estabilidade estrutural e potencial de retenção de contaminantes apresentados pela escória de aciaria LD e pela lama de ETA. Posteriormente, foram discutidos



os mecanismos de interação entre agregado siderúrgico e lama de ETA, com ênfase nos aspectos geoquímicos, hidráulicos e ambientais. Também foram considerados fatores relacionados à economia circular, simbiose industrial e reaproveitamento sustentável de resíduos provenientes de diferentes cadeias produtivas.

Por fim, realizou-se síntese crítica das informações obtidas, permitindo discussão integrada acerca do potencial da proposta AGS-LET como contribuição à gestão sustentável de resíduos industriais. A análise final buscou correlacionar os resultados identificados na literatura com aplicações geoambientais voltadas à redução da disposição final de resíduos, mitigação de impactos ambientais e valorização de coprodutos industriais e de saneamento. Dessa forma, tornou-se possível compreender o potencial técnico, ambiental e estratégico da proposta para desenvolvimento de soluções sustentáveis em engenharia geoambiental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da análise da literatura evidenciaram que a escória de aciaria LD apresenta elevado potencial para aplicações geoambientais em função de suas propriedades físico-químicas e mineralógicas. A predominância de óxidos básicos, especialmente cálcio, magnésio e ferro, confere ao material elevada alcalinidade e potencial reativo, características associadas a processos de estabilização geoquímica e retenção de contaminantes.

Verificou-se que o beneficiamento da escória desempenha papel fundamental para viabilizar seu uso em aplicações ambientais. Processos de britagem, peneiramento, separação magnética e maturação contribuem para estabilização volumétrica e adequação granulométrica do material, reduzindo riscos associados à expansibilidade.

Esse comportamento reforça os fundamentos apresentados no referencial teórico acerca da importância do beneficiamento dos coprodutos siderúrgicos para aplicações geoambientais. Conforme discutido por Masuero (2018) e Dal Molin e Masuero (2019), o





controle granulométrico e os processos de maturação contribuem significativamente para estabilidade física e química das escórias siderúrgicas, reduzindo riscos de expansibilidade associados à presença de CaO e MgO livres. Dessa forma, o beneficiamento adequado do agregado siderúrgico amplia a segurança ambiental e o potencial de utilização do material em sistemas geotécnicos e aplicações de engenharia ambiental.

A compreensão da evolução da produção siderúrgica torna-se relevante para contextualizar a magnitude da geração de coprodutos minerais associados ao setor do aço. O crescimento contínuo da produção mundial e nacional evidencia o aumento potencial na geração de escórias siderúrgicas, reforçando a necessidade de estratégias voltadas ao reaproveitamento sustentável desses materiais em aplicações geoambientais. Nesse contexto, a Figura 3, abaixo, apresenta a evolução histórica da produção de aço bruto no mundo, na América Latina e no Brasil entre os anos de 1980 e 2024.

Figura 3 - Evolução da produção de aço bruto no mundo, América Latina e Brasil entre 1980 e 2024.

Indústria do Aço Brasileira e Mundial <i>World and Brazilian Steel Industry</i>						
Unid./Unit: 10 ⁶ t						
PRODUÇÃO DE AÇO BRUTO/ <i>CRUDE STEEL PRODUCTION</i>	1980	1990	2000	2010	2020	2024
Mundial/World - (A)	715,6	770,5	848,9	1.435,2	1.883,3	1.884,6
América Latina/ <i>Latin America</i> - (B)	28,9	38,2	56,1	61,7	55,8	56,4
Brasil/Brazil - (C)	15,3	20,6	27,9	32,9	31,4	33,9
C/A (%)	2,1	2,7	3,3	2,3	1,7	1,8
C/B (%)	52,9	53,9	49,7	53,3	56,3	60,1
Posição Relativa do Brasil no Mundo/ <i>Brazil's Ranking Worldwide</i>	10 ^o	9 ^o	8 ^o	9 ^o	9 ^o	9 ^o
	10 th	9 th	8 th	9 th	9 th	9 th
Fonte/Source: worldsteel/ALACERO/Aço Brasil						

Fonte: Instituto Aço Brasil (2025), com dados da *World Steel Association* (worldsteel), Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO) e Instituto Aço Brasil.

Em relação à lama de ETA, os estudos analisados indicaram que o material apresenta elevada fração fina, grande superfície específica e presença significativa de hidróxidos metálicos, fatores que favorecem comportamento associado à redução da permeabilidade e retenção de espécies potencialmente móveis. Os resultados observados apresentam

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 6 (2026) - DOSSIÊ ESPECIAL:
Conhecimento, Formação e Transformação Social

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição
(CC BY)





convergência com as discussões desenvolvidas no referencial teórico acerca das propriedades geoambientais da lama de ETA. Conforme destacado por Boscov (2008), materiais com elevada fração fina e baixa permeabilidade apresentam comportamento favorável para utilização em sistemas de cobertura ambiental e barreiras hidráulicas. Além disso, Babatunde e Zhao (2007) ressaltam que a presença de hidróxidos metálicos favorece processos de adsorção e retenção química, ampliando o potencial ambiental desses resíduos em aplicações voltadas ao controle de contaminantes.

Além das características físico-químicas da lama de ETA, torna-se fundamental compreender a magnitude operacional associada à geração desse resíduo nos sistemas de abastecimento público. O aumento da demanda hídrica e da capacidade de tratamento das ETAs resulta diretamente na ampliação dos volumes de lama produzidos, intensificando desafios relacionados ao manejo, transporte e disposição final desse material. Em grandes centros urbanos, a expansão dos sistemas de abastecimento e o crescimento populacional contribuem para aumento contínuo da geração desse resíduo, elevando custos operacionais e exigindo desenvolvimento de estratégias mais eficientes de gerenciamento ambiental.

A dimensão desse passivo ambiental pode ser estimada a partir dos volumes de água tratados anualmente no Brasil e da proporção média de geração de lodo observada em estações de tratamento de água. A magnitude operacional desse resíduo também pode ser observada em sistemas de abastecimento de grande porte. Dados apresentados pela Sabesp indicam que a ETA Cubatão produz aproximadamente 75 toneladas de lodo por dia, enquanto a ETA Taiaçupeba gera cerca de 225 toneladas diárias. Esses valores evidenciam que a geração de lama de ETA ocorre em escala expressiva e contínua, impondo desafios relacionados ao transporte, armazenamento e destinação final do material. Assim, alternativas de reaproveitamento capazes de absorver grandes volumes desse resíduo tornam-se estratégicas para a sustentabilidade dos sistemas de saneamento (EMBRAPA, 2023).

Dados operacionais da ETA Cubatão (SABESP) indicam geração aproximada de 75 toneladas diárias de lodo úmido para um volume tratado de cerca de 328 mil m³ de água por



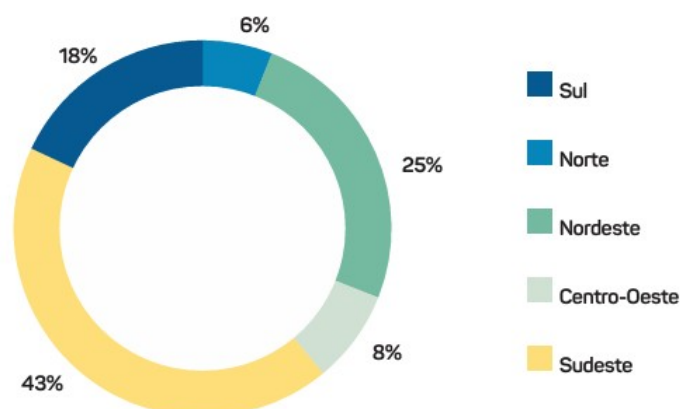


dia, correspondendo a aproximadamente 0,7% do volume processado. Considerando que os sistemas brasileiros de abastecimento trataram aproximadamente 6,7 bilhões de m³ de água por ano, estima-se uma geração potencial próxima de 46,9 milhões de m³ de lama de ETA anualmente (Brasil, 2025; FAPESP, 2021). Esse volume evidencia a magnitude do passivo ambiental associado às ETAs brasileiras e reforça a necessidade de alternativas sustentáveis de reaproveitamento, como a proposta AGS-LET.

Para complementar a análise do volume potencial de lama de ETA gerado no Brasil, a Figura 4 apresenta a distribuição percentual estimada desse resíduo entre as regiões brasileiras. Embora a estimativa nacional indique geração anual expressiva, a distribuição regional permite identificar os locais onde os desafios relacionados ao manejo, transporte e reaproveitamento da lama tendem a ser mais significativos.

Observa-se que a produção encontra-se fortemente concentrada nas regiões Sudeste e Nordeste, refletindo a maior densidade populacional e a elevada demanda por abastecimento público de água nessas localidades. A representação gráfica permite compreender de forma mais clara a dimensão territorial da geração desse passivo ambiental e evidencia a importância de estratégias regionais voltadas ao reaproveitamento e à gestão sustentável da lama de ETA.

Figura 4. Estimativa do volume anual de lama de ETA gerado no Brasil e distribuição regional da produção.



Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2022).



Conforme apresentado na Figura 4, a Região Sudeste concentra aproximadamente 43% da produção nacional de lama de ETA, seguida pela Região Nordeste, responsável por cerca de 25% do total gerado. As regiões Sul, Centro-Oeste e Norte participam com aproximadamente 18%, 8% e 6%, respectivamente. Essa distribuição acompanha a concentração populacional e a infraestrutura de abastecimento de água existente no país, uma vez que regiões mais populosas demandam maiores volumes de água tratada e, consequentemente, produzem maiores quantidades de resíduos provenientes das etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Sob a perspectiva da gestão ambiental, os dados demonstram que os maiores desafios relacionados ao manejo e à destinação da lama de ETA encontram-se justamente nas regiões que concentram os maiores sistemas de abastecimento, reforçando a relevância de tecnologias capazes de promover o reaproveitamento desse material. Nesse contexto, a proposta AGS-LET apresenta potencial estratégico ao possibilitar a valorização da lama de ETA em conjunto com resíduos siderúrgicos, contribuindo para a redução dos passivos ambientais e para o fortalecimento dos princípios da economia circular.

Além disso, a disposição inadequada da lama pode ocasionar impactos ambientais associados à contaminação de corpos hídricos, ocupação de áreas para descarte e elevação dos passivos ambientais dos sistemas de saneamento. Nesse contexto, a busca por alternativas sustentáveis de reaproveitamento torna-se cada vez mais relevante, especialmente em aplicações capazes de promover valorização ambiental e funcional desses materiais.

Ainda, a destinação convencional da lama de ETA também gera custos significativos para as empresas de saneamento. Segundo a Sabesp, o custo médio de disposição desse resíduo em aterros pode alcançar aproximadamente R\$ 300,00 por tonelada, configurando uma despesa contínua sem retorno econômico direto. Nesse cenário, estratégias de valorização do resíduo apresentam potencial não apenas para redução dos impactos ambientais, mas também para diminuição dos custos operacionais associados ao gerenciamento da lama de ETA (EMBRAPA, 2023).



Nesse contexto, a análise da relação entre volume de água tratada e geração de lama permite compreender a dimensão ambiental desse passivo operacional e reforça a necessidade de desenvolvimento de estratégias sustentáveis voltadas ao reaproveitamento desses resíduos. A utilização integrada da lama de ETA com agregado siderúrgico apresenta potencial relevante para aplicações geoambientais, permitindo transformar um passivo operacional em material funcional aplicável em soluções de engenharia ambiental. Dessa forma, o reaproveitamento desse resíduo contribui simultaneamente para fortalecimento da economia circular, redução da disposição final de resíduos e valorização sustentável de coprodutos industriais e de saneamento.

Os resultados observados corroboram as discussões desenvolvidas no referencial teórico acerca da simbiose industrial e da economia circular aplicadas à gestão sustentável de resíduos. Conforme destacado por Mont'alverne (2025), a integração entre resíduos provenientes de diferentes cadeias produtivas representa estratégia relevante para redução de impactos ambientais e valorização de coprodutos industriais. Nesse contexto, a associação entre lama de ETA e agregado siderúrgico demonstra potencial para reinserção sustentável desses materiais em novos ciclos produtivos, reduzindo simultaneamente a disposição final de resíduos e a demanda por recursos naturais convencionais.

A análise integrada dos materiais demonstrou que a complementaridade entre agregado siderúrgico e lama de ETA pode favorecer desenvolvimento de compósitos com propriedades geoambientais relevantes. Observou-se que a fração granular do agregado siderúrgico contribui para melhoria do comportamento mecânico do sistema, enquanto a fração fina da lama favorece redução da permeabilidade. Essa interação entre características físicas distintas possibilita formação de estruturas mais estáveis sob perspectiva hidráulica e geotécnica, ampliando o potencial de aplicação do compósito em sistemas de cobertura ambiental e barreiras hidráulicas.

Além disso, a alcalinidade da escória LD associada à presença de hidróxidos metálicos na lama de ETA favorece mecanismos de estabilização geoquímica e retenção de





contaminantes potencialmente móveis. A interação entre os materiais também contribui para melhoria da compactação e redução de vazios no sistema, favorecendo maior eficiência ambiental e estrutural do compósito. Nesse contexto, o sistema AGS-LET demonstra potencial relevante para desenvolvimento de soluções sustentáveis voltadas à engenharia geoambiental e valorização integrada de resíduos industriais e de saneamento.

Tal comportamento está diretamente relacionado às características físico-químicas discutidas no referencial teórico, especialmente no que se refere à alcalinidade da escória LD e à elevada fração fina da lama de ETA. Segundo Piatak et al. (2015), materiais alcalinos favorecem processos de estabilização geoquímica e precipitação química de contaminantes, enquanto Babatunde e Zhao (2007) destacam que resíduos ricos em hidróxidos metálicos apresentam elevada capacidade de adsorção e retenção química. Assim, a complementaridade entre os materiais contribui para melhoria simultânea do desempenho hidráulico, estrutural e ambiental do compósito AGS-LET.

Compreender de forma comparativa as propriedades individuais dos materiais e o comportamento do compósito AGS-LET torna-se fundamental para avaliar o potencial geoambiental da proposta investigada. A associação entre agregado siderúrgico e lama de ETA promove interação entre características físicas, químicas e hidráulicas complementares, favorecendo melhoria do desempenho ambiental e geotécnico do sistema. Nesse contexto, o Quadro 1 apresenta comparação das principais características geoambientais do agregado siderúrgico, da lama de ETA e do *blend* AGS-LET, destacando atributos relacionados à composição, estabilidade, comportamento hidráulico, potencial ambiental e aplicações em engenharia.

Quadro 1 - Comparação das características geoambientais do agregado siderúrgico, lama de ETA e *blend* AGS-LET.

Parâmetro	Agregado siderúrgico (Escória LD)	Lama de ETA	Blend AGS-LET
Origem	Processo de refino do aço	Tratamento convencional	Mistura entre agregado





	em conversor LD	de água	siderúrgico e lama de ETA
Característica predominante	Material granular alcalino	Material fino e coesivo	Compósito geoambiental
Composição principal	Óxidos de Ca, Mg, Fe e Si	Hidróxidos metálicos, matéria orgânica e partículas finas	Associação mineralógica e geoquímica dos dois resíduos
Potencial geoquímico	Elevada alcalinidade e capacidade cimentante	Adsorção e retenção de contaminantes	Estabilização química integrada
Comportamento hidráulico	Maior permeabilidade	Baixa permeabilidade	Redução da permeabilidade do sistema
Estabilidade mecânica	Elevada resistência estrutural	Baixa resistência isolada	Ganho de estabilidade estrutural
Potencial ambiental	Imobilização de contaminantes e neutralização química	Retenção de espécies potencialmente móveis	Mitigação da mobilidade química
Limitações	Possível expansibilidade por CaO e MgO livres	Elevada umidade e baixa resistência	Necessidade de controle granulométrico e homogeneização
Aplicações potenciais	Pavimentação, aterros e barreiras hidráulicas	Cobertura, selagem e aplicações ambientais	Aterros de nivelamento, cobertura e recuperação ambiental
Contribuição à economia circular	Reaproveitamento de coproduto siderúrgico	Valorização de resíduo de saneamento	Integração sustentável entre setores industriais

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As características comparativas apresentadas no Quadro 1 foram confirmadas por resultados experimentais obtidos em aplicações do sistema AGS-LET. Observou-se que a associação entre agregado siderúrgico e lama de ETA favoreceu redução da alcalinidade inicialmente elevada da escória LD, promovendo estabilização do pH em valores próximos à neutralidade ao final do monitoramento. Simultaneamente, verificou-se redução superior a 60% das concentrações de alumínio solubilizado quando comparadas às campanhas iniciais, evidenciando melhoria do desempenho geoquímico do compósito ao longo do tempo.





Do ponto de vista geoquímico, verificou-se potencial para ocorrência de mecanismos de precipitação, adsorção e coprecipitação de contaminantes, especialmente em função da alcalinidade do sistema e da presença de hidróxidos metálicos. Além dos mecanismos de adsorção e precipitação, a interação entre agregado siderúrgico e lama de ETA pode favorecer processos de carbonatação e formação de fases cimentantes secundárias ao longo do tempo. A reação entre compostos ricos em cálcio presentes na escória LD e o dióxido de carbono atmosférico tende a promover formação de carbonatos mais estáveis, contribuindo para redução gradual da alcalinidade excessiva e aumento da estabilidade geoquímica do sistema. Esse comportamento é particularmente relevante em aplicações geoambientais, uma vez que favorece diminuição da mobilidade de espécies potencialmente contaminantes e consolidação estrutural do compósito.

Resultados experimentais obtidos em sistemas AGS-LET corroboram essa interpretação teórica. Durante o monitoramento dos blends produzidos com agregado siderúrgico e lama de ETA, observou-se redução progressiva da alcalinidade do sistema, com valores de pH inicialmente situados entre 11,9 e 12,5 evoluindo para aproximadamente 7,4 e 7,5 nas campanhas finais. Paralelamente, as concentrações de alumínio solubilizado reduziram de valores próximos a 0,90 mg/L para faixas entre 0,28 e 0,33 mg/L ao final do período de monitoramento. Esses resultados evidenciam a ocorrência de processos de estabilização geoquímica capazes de reduzir a mobilidade química dos constituintes presentes no sistema.

Evidências experimentais obtidas em estudos envolvendo a aplicação do sistema AGS-LET reforçam essa interpretação. Durante o monitoramento dos blends produzidos com agregado siderúrgico e lama de ETA, observou-se redução progressiva da alcalinidade do sistema, com valores de pH inicialmente situados entre 11,9 e 12,5 evoluindo para aproximadamente 7,4 e 7,5 nas campanhas finais de avaliação. Paralelamente, as concentrações de alumínio solubilizado apresentaram redução de valores próximos a 0,90 mg/L para faixas entre 0,28 e 0,33 mg/L ao final do período de monitoramento. Os resultados





também indicaram baixa mobilidade dos metais avaliados, com concentrações de bário em torno de 0,34 a 0,35 mg/L e valores de cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio inferiores aos limites de quantificação analítica. Esses resultados demonstram que a interação entre a alcalinidade da escória LD e a capacidade adsorptiva da lama de ETA favorece mecanismos de estabilização geoquímica e retenção de contaminantes, corroborando as discussões apresentadas por Piatak *et al.* (2015) e Tsugawa *et al.* (2021).

Esse comportamento geoquímico demonstra forte relação com as propriedades discutidas ao longo do referencial teórico, especialmente quanto à interação entre resíduos alcalinos e materiais ricos em partículas finas. Segundo Tsugawa *et al.* (2021), sistemas geoambientais contendo escórias siderúrgicas tendem a favorecer processos de imobilização química e estabilização de contaminantes ao longo do tempo. Simultaneamente, a presença de hidróxidos metálicos na lama de ETA potencializa mecanismos de adsorção superficial, contribuindo para redução da mobilidade química no compósito AGS-LET.

A evolução temporal dos parâmetros monitorados também demonstrou aumento da estabilidade ambiental do compósito. Os resultados indicaram manutenção de baixas concentrações de metais potencialmente contaminantes durante todo o período experimental. As concentrações de bário permaneceram em torno de 0,34 mg/L e 0,35 mg/L nos blends avaliados, enquanto elementos como cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio permaneceram abaixo dos limites de quantificação analítica. Esse comportamento sugere eficiência dos mecanismos de precipitação, adsorção e coprecipitação discutidos na literatura.

Os resultados também evidenciaram que o reaproveitamento integrado desses resíduos pode contribuir para redução da disposição final de materiais industriais e de saneamento, promovendo simultaneamente valorização de coprodutos e redução da demanda por agregados naturais. Esse comportamento demonstra alinhamento com os princípios da economia circular, uma vez que favorece reinserção de materiais anteriormente tratados como passivos ambientais em novos ciclos produtivos. Além dos benefícios ambientais associados à diminuição da disposição em aterros convencionais, a utilização desses materiais também





contribui para mitigação dos impactos relacionados à extração de recursos minerais naturais. Dessa forma, a proposta AGS-LET apresenta potencial para fortalecimento de práticas sustentáveis voltadas à engenharia geoambiental e à gestão integrada de resíduos industriais e de saneamento.

Outro aspecto identificado refere-se ao alinhamento da proposta AGS-LET com estratégias associadas à economia circular e sustentabilidade industrial. O uso integrado desses materiais favorece reinserção de resíduos em novos ciclos produtivos e reduz impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Além disso, a valorização simultânea de coprodutos siderúrgicos e resíduos de saneamento contribui para diminuição da demanda por matérias-primas naturais, reduzindo pressões sobre recursos minerais e áreas destinadas à disposição final de resíduos. Esse cenário reforça a importância de soluções intersetoriais voltadas ao fortalecimento de práticas ambientalmente sustentáveis e ao desenvolvimento de modelos produtivos mais eficientes e circulares.

Além disso, observou-se que aplicações geoambientais envolvendo materiais alternativos apresentam potencial para redução de custos operacionais relacionados à disposição final de resíduos e aquisição de materiais convencionais. A reutilização de coprodutos siderúrgicos e resíduos de saneamento pode diminuir gastos associados ao transporte, armazenamento e disposição em aterros industriais, contribuindo para maior eficiência econômica dos processos produtivos. Paralelamente, a substituição parcial de agregados naturais reduz custos relacionados à extração e beneficiamento de matérias-primas convencionais, promovendo utilização mais racional dos recursos naturais disponíveis. Esse cenário demonstra que estratégias de reaproveitamento de resíduos podem gerar benefícios simultaneamente ambientais, operacionais e econômicos, fortalecendo práticas sustentáveis voltadas à engenharia geoambiental e à gestão integrada de resíduos sólidos.

Destarte, sublinha-se que os resultados obtidos reforçam que a valorização de coprodutos siderúrgicos representa importante estratégia para fortalecimento da sustentabilidade industrial e redução de impactos ambientais associados à disposição final de



resíduos. No contexto da proposta AGS-LET, a integração entre agregado siderúrgico e lama de ETA demonstra potencial significativo para desenvolvimento de soluções geoambientais alinhadas aos princípios da economia circular.

A elevada alcalinidade da escória LD constitui uma das propriedades mais relevantes para aplicações ambientais. Estudos indicam que materiais alcalinos podem favorecer processos de precipitação química e imobilização de espécies potencialmente móveis, reduzindo riscos associados à contaminação ambiental. Quando associada à presença de hidróxidos metálicos e partículas finas da lama de ETA, essa característica tende a potencializar mecanismos de retenção geoquímica.

A relevância desse comportamento pode ser observada em resultados experimentais obtidos para sistemas compostos por escória LD e lama de ETA, nos quais foi verificada redução gradual da alcalinidade ao longo do processo de maturação do material. A diminuição dos valores de pH para faixas próximas à neutralidade foi acompanhada pela redução das concentrações de alumínio em extratos solubilizados e pela manutenção de baixas concentrações dos metais monitorados. Tais resultados sugerem que processos de precipitação, carbonatação e adsorção química contribuem para aumento da estabilidade geoquímica do sistema, ampliando seu potencial de aplicação em coberturas ambientais, barreiras hidráulicas e estruturas destinadas ao controle da mobilidade de contaminantes.

Sob perspectiva geotécnica, a complementaridade granulométrica entre os materiais também se mostra relevante. Enquanto a fração fina da lama contribui para redução da permeabilidade, o agregado siderúrgico atua na melhoria da estabilidade estrutural do compósito. Essa interação favorece aplicações em sistemas de cobertura, barreiras hidráulicas e recuperação ambiental.

Outro aspecto importante refere-se ao potencial de substituição parcial de materiais naturais utilizados em obras geotécnicas. O reaproveitamento de resíduos industriais reduz pressão sobre recursos minerais e contribui para diminuição dos impactos ambientais associados à extração de agregados convencionais.





Ainda, no que tange a perspectiva ambiental, a substituição parcial de agregados naturais por coprodutos siderúrgicos também contribui para redução dos impactos associados à exploração mineral convencional, incluindo degradação de áreas de extração, consumo energético e emissão de gases de efeito estufa. Além disso, a utilização integrada da lama de ETA reduz a necessidade de disposição em aterros convencionais, promovendo reaproveitamento simultâneo de resíduos provenientes de diferentes cadeias produtivas. Essa integração reforça os princípios da simbiose industrial e demonstra o potencial de soluções intersetoriais voltadas à gestão sustentável de resíduos.

A discussão também evidencia que o avanço de soluções como o AGS-LET depende do fortalecimento de instrumentos normativos e da ampliação de estudos experimentais em escala real. Embora os resultados disponíveis indiquem potencial promissor, aplicações práticas demandam monitoramento contínuo e avaliação de desempenho de longo prazo.

Os resultados disponíveis para o sistema AGS-LET indicam comportamento ambiental favorável após o período de maturação do material. A redução do pH de valores superiores a 11 para aproximadamente 7,5, associada à diminuição das concentrações de alumínio e à manutenção de baixas concentrações dos metais monitorados, demonstra potencial para utilização do compósito em aplicações geoambientais. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica da proposta e indicam que a interação entre escória LD e lama de ETA favorece processos de estabilização compatíveis com sistemas destinados ao confinamento e controle ambiental.

Essa necessidade reforça as limitações apontadas no referencial teórico acerca da aplicação prática de compósitos geoambientais produzidos a partir de resíduos industriais. Meshram, Kumar e Singh (2023) destacam que, apesar do elevado potencial ambiental das escórias siderúrgicas, a consolidação dessas aplicações depende de monitoramento contínuo, controle operacional e avaliação de desempenho em longo prazo. Assim, o avanço de pesquisas experimentais e o fortalecimento de diretrizes normativas tornam-se fundamentais para ampliação da segurança técnica e ambiental do sistema AGS-LET.





Além disso, a adoção de estratégias integradas de reaproveitamento de resíduos exige maior aproximação entre diferentes setores produtivos. A interação entre siderurgia e saneamento demonstra como a simbiose industrial pode gerar benefícios ambientais, econômicos e tecnológicos. A utilização conjunta de coprodutos provenientes de diferentes cadeias produtivas favorece redução da disposição final de resíduos, otimização do uso de recursos naturais e fortalecimento de práticas associadas à economia circular. Paralelamente, essa integração contribui para desenvolvimento de soluções ambientais inovadoras, ampliando possibilidades de aplicação de materiais alternativos em sistemas geoambientais e fortalecendo modelos produtivos mais sustentáveis e eficientes.

No contexto das políticas públicas ambientais, a proposta AGS-LET apresenta alinhamento com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, especialmente no que se refere à valorização de resíduos e à priorização de práticas voltadas ao reaproveitamento de materiais.

A partir das análises realizadas, conclui-se que o sistema AGS-LET constitui alternativa tecnicamente promissora para contribuição à gestão sustentável de resíduos no setor siderúrgico. A integração entre agregado siderúrgico e lama de ETA demonstra potencial para redução de passivos ambientais, fortalecimento da economia circular e desenvolvimento de soluções inovadoras em engenharia ambiental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou o potencial da proposta AGS-LET como alternativa sustentável para utilização integrada de agregado siderúrgico derivado da escória LD e lama de ETA em aplicações geoambientais. Os resultados evidenciaram que a complementaridade físico-química entre os materiais favorece mecanismos de estabilização geoquímica, retenção de contaminantes e redução da permeabilidade do sistema. Além disso, observou-se que a interação entre os resíduos contribui para melhoria das propriedades hidráulicas e estruturais

**Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 6 (2026) - DOSSIÊ ESPECIAL:
Conhecimento, Formação e Transformação Social**

**A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição
(CC BY)**





do compósito, ampliando as possibilidades de aplicação em sistemas ambientais voltados ao confinamento e controle de contaminantes.

Verificou-se que a escória siderúrgica contribui para melhoria da estabilidade estrutural do compósito, enquanto a lama de ETA favorece maior retenção hídrica e controle hidráulico. Essas características ampliam o potencial de aplicação do sistema em coberturas ambientais, barreiras hidráulicas e recuperação de áreas degradadas. Do ponto de vista geoquímico, a alcalinidade da escória LD associada à presença de hidróxidos metálicos da lama de ETA favorece mecanismos de precipitação química, adsorção e imobilização de espécies potencialmente contaminantes, contribuindo para melhoria do desempenho ambiental do sistema.

Além dos benefícios técnicos observados, a proposta apresenta alinhamento com os princípios da economia circular e sustentabilidade industrial, promovendo o reaproveitamento simultâneo de resíduos provenientes de diferentes cadeias produtivas e reduzindo impactos associados à disposição final convencional. Esse potencial encontra respaldo em iniciativas recentes desenvolvidas pela Embrapa e pela Sabesp, que buscam transformar a lama de ETA em produtos de maior valor agregado, demonstrando que resíduos tradicionalmente considerados passivos ambientais podem ser reinseridos em novos ciclos produtivos. Dessa forma, o sistema AGS-LET apresenta convergência com estratégias contemporâneas voltadas à valorização sustentável de resíduos e ao fortalecimento da simbiose industrial. A utilização integrada desses materiais também contribui para diminuição da demanda por agregados naturais, reduzindo pressões relacionadas à exploração mineral e fortalecendo estratégias voltadas à valorização sustentável de coprodutos industriais e resíduos de saneamento.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial da proposta AGS-LET para fortalecimento da simbiose industrial entre os setores siderúrgico e de saneamento ambiental. A integração entre diferentes cadeias produtivas demonstra como resíduos anteriormente tratados como passivos ambientais podem ser reinseridos em novos ciclos produtivos, promovendo benefícios ambientais, econômicos e operacionais. Nesse sentido, o sistema





apresenta potencial para contribuir com práticas mais sustentáveis de gerenciamento de resíduos sólidos e desenvolvimento de soluções inovadoras em engenharia geoambiental.

A estimativa de aproximadamente 46,9 milhões de m³ de lama de ETA gerados anualmente no Brasil evidencia a dimensão do desafio associado ao gerenciamento desse resíduo e reforça a relevância de estratégias capazes de promover sua valorização e reinserção em novos ciclos produtivos.

Entretanto, a consolidação prática do sistema AGS-LET ainda demanda ampliação de estudos experimentais, monitoramento de longo prazo e padronização operacional dos materiais utilizados. Além disso, torna-se necessária realização de avaliações complementares relacionadas à estabilidade geoquímica, comportamento hidráulico e desempenho estrutural do compósito em diferentes condições ambientais e operacionais. Dessa forma, conclui-se que a proposta representa alternativa promissora para fortalecimento da gestão sustentável de resíduos siderúrgicos e de saneamento em aplicações de engenharia geoambiental, apresentando potencial relevante para redução de passivos ambientais, valorização de coprodutos e fortalecimento da economia circular.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-1:2024 – Resíduos sólidos – Classificação – Parte 1: Requisitos de classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. Disponível em: ABNT Catálogo. Acesso em: 01 jun. 2026.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005:2024 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. Disponível em: ABNT Catálogo. Acesso em: 01 jun. 2026.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006:2024 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. Disponível em: ABNT Catálogo. Acesso em: 01 jun. 2026.





ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S.; CORNELI, V. M. Avaliação da geração de lodo de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 53-62, 2013.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Qualidade da água e gestão de lodos de ETA: relatório técnico 2024. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos?utm_source. Acesso em: 21 nov. 2025.

BABATUNDE, A.; ZHAO, Y. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Philadelphia, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 01 jun. 2026.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Relatório dos Serviços de Abastecimento de Água: SINISA 2024, ano de referência 2023**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa>. Acesso em: 01 jun. 2026.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO (COMPESA). Dados operacionais da Estação de Tratamento de Água Botafogo. Recife: COMPESA, 2010. Apud SILVA, José Marcos da. *Caracterização de resíduos de estação de tratamento de água e avaliação de alternativas de gerenciamento*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

DAL MOLIN, D.; MASUERO, A. **Materiais cimentícios e coprodutos siderúrgicos aplicados à construção civil**. Porto Alegre: UFRGS, 2019.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.; VOLTAN, P. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Circular economy systems diagram*. Cowes: **Ellen MacArthur Foundation**, 2019. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>. Acesso em: 01 jun. 2026.





FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP).

Embrapa parceria quer transformar lodo de estação de tratamento de água em fertilizantes. 2021.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP).

Embrapa: parceria quer transformar lodo de estação de tratamento de água em

fertilizantes. *Na Mídia FAPESP*, São Paulo, 13 jun. 2023. Disponível em: Na Mídia FAPESP.

Acesso em: 01 jun. 2026

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade da siderurgia brasileira.** Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025. Disponível em:

[https://www.acobrasil.org.br/site/noticia/sustentabilidade-inoxidavel/?](https://www.acobrasil.org.br/site/noticia/sustentabilidade-inoxidavel/?utm_source=chatgpt.com)

[utm_source=chatgpt.com](https://www.acobrasil.org.br/site/noticia/sustentabilidade-inoxidavel/?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 01 junho 2026.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Anuário Estatístico 2025*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025. Disponível em: Instituto Aço Brasil – Anuário Estatístico 2025. Acesso em: 01 jun. 2026.

MARCHI, C. **Gestão de resíduos sólidos: conceitos e perspectivas de atuação.** Curitiba: Appris, 2018.

MASUERO, A. B. **Aproveitamento de resíduos siderúrgicos em aplicações geotécnicas e ambientais.** Porto Alegre: UFRGS, 2018.

MESHRAM, P.; KUMAR, A.; SINGH, R. Steel slag valorization and industrial sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 320, p. 1-15, 2023.

MONT'ALVERNE, A. **Estratégias de valorização de coprodutos siderúrgicos no contexto da economia circular.** Belo Horizonte: UFMG, 2025.

PIATAK, N. et al. Characteristics and environmental aspects of steel slag. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, Chantilly, v. 79, p. 617-658, 2015.

RIBEIRO, F. V. **O gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil: uma análise sobre a política nacional, classificações e desafios do saneamento básico.** São Paulo: Científica Digital, 2026.





SILVA, José Marcos da. **Caracterização de resíduos de estação de tratamento de água e avaliação de alternativas de gerenciamento**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

TSUGAWA, J. K. *et al.* Environmental performance of steel slag in geoenvironmental systems. **Environmental Geotechnics**, London, v. 8, n. 4, p. 245-260, 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World steel in figures 2024**. Brussels: World Steel Association, 2024. Disponível em: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf?utm_source. Acesso em: 01 junho 2026.

Recebido em: 02/06/2026

Aprovado em: 06/06/2026

Publicado em: 12/06/2026

