

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ANA CLARA DE OLIVEIRA FARIAS

**ECONOMIA CIRCULAR: APLICAÇÕES DA ESCÓRIA DE ALTO
FORNO**

VOLTA REDONDA

2023

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ECONOMIA CIRCULAR: APLICAÇÕES DA ESCÓRIA DE
ALTO FORNO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção do UniFOA como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aluna:

Ana Clara De Oliveira Farias

Orientadora:

Prof.^a MSc Lara Barbosa de Oliveira Prado

Coorientadora:

Prof.^a DSc. Sirlei Aparecida de Oliveira Bubnoff

VOLTA REDONDA

2023

FOLHA DE APROVAÇÃO

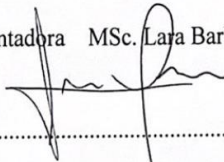
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **ECONOMIA CIRCULAR: APLICAÇÕES DA ESCÓRIA NO ALTO FORNO**

Elaborado por **Ana Clara de Oliveira Farias** -Matrícula 202221046, foi apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora no *Campus* Três Poços, prédio 6, Laboratório de Inovação, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia de Produção.

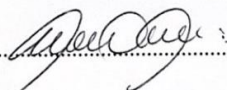
Aprovada em 08 de novembro de 2023

Banca Avaliadora:

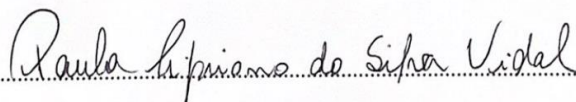
Professora Orientadora MSc. Lara Barbosa de Oliveira Prado – UniFOA



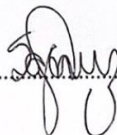
Professora Coorientadora DSc. Sirlei Aparecida de Oliveira Bubnoff – UniFOA



Professora Avaliadora DSc. Paula Cipriano da Silva Vidal – UniFOA



Professora Avaliadora DSc. Samantha Grisol Cruz Nobre – UniFOA



Consagro este estudo antes de tudo a Deus, à minha família, amigos, professores e orientadores que apoiaram ininterruptamente durante todo o curso.

AGRADECIMENTOS

Consagro este trabalho a todas as pessoas que fizeram parte deste ciclo da minha vida. Gratidão a Deus por ter me dado forças, aos meus pais Rosimeire Pimenta e Waldir Farias por terem concedido a realização deste sonho. Agradeço ao meu irmão Marcos Vinícius Farias, pelo apoio na minha caminhada, que sempre me ajudou no que podia para que esse grande sonho fosse realizado. A todos os educadores, por todas orientações e auxílio durante os meus estudos. A minha orientadora Lara Prado e coorientadora Sirlei Bubnoff por todo carinho e dedicação do meu TCC.

RESUMO

O setor siderúrgico, tem grande relevância no cenário econômico global e enfrenta desafios significativos na gestão de resíduos, especialmente a escória de alto forno. Este estudo tem o objetivo de analisar as potencialidades e desafios da implementação da Economia Circular (EC) na gestão e aproveitamento desse resíduo, buscando transformá-lo em um recurso valioso para a indústria. Para a realização da pesquisa, a metodologia de revisão bibliográfica foi utilizada. Na qual foram analisados estudos que mostram a aplicação da economia circular em uma siderurgia. Com isso, o objeto de análise foram publicações especializadas em economia circular, relatórios, artigos e dissertações. O estudo revelou que a aplicação da EC na gestão da escória de alto forno pode trazer benefícios econômicos, ambientais e sociais significativos. A reutilização e reciclagem da escória, quando alinhadas aos princípios da EC, podem reduzir custos, minimizar impactos ambientais e promover inovação no setor. Contudo, a mudança para uma economia circular na siderurgia requer uma abordagem holística, envolvendo políticas públicas, pesquisa, cooperação setorial e conscientização. Em conclusão, a Economia Circular se apresenta como uma solução viável e necessária para a gestão da escória de alto forno na siderurgia, com vastas oportunidades, mas também com desafios que exigem esforço coletivo e visão estratégica. A adoção da EC pode transformar a siderurgia em um exemplo de indústria sustentável, alinhada aos desafios do século XXI.

Palavras-chave: Escória, Reaproveitamento, Siderúrgica.

ABSTRACT

The steel sector has great relevance in the global economic scenario and faces significant challenges in waste management, especially blast furnace slag. This study aims to analyze the potential and challenges of implementing the Circular Economy (CE) in the management and use of this waste, seeking to transform it into a valuable resource for the industry. To carry out the research, the bibliographic review methodology was used. In which studies were analyzed that show the application of the circular economy in a steel industry. Therefore, the object of analysis were publications specializing in the circular economy, reports, articles and dissertations. The study revealed that the application of CE in the management of blast furnace slag can bring significant economic, environmental and social benefits. The reuse and recycling of slag, when aligned with CE principles, can reduce costs, minimize environmental impacts and promote innovation in the sector. However, the shift to a circular economy in the steel industry requires a holistic approach, involving public policies, research, sectoral cooperation and awareness. In conclusion, the Circular Economy presents itself as a viable and necessary solution for managing blast furnace slag in the steel industry, with vast opportunities, but also with challenges that require collective effort and strategic vision. The adoption of CE can transform the steel industry into an example of a sustainable industry, aligned with the challenges of the 21st century.

Keywords: Slag, Reuse, Steelmaking.

LISTA DE SIGLAS

Al_2O_3	Alumínio
CaO	Óxido de cálcio
EC	Economia Circular
MgO	Magnésio
Mn	Manganês
CaCO_3	Carbonato de Cálcio
CO_2	Dióxido de carbono
CE	Comissão Europeia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: 4R's do modelo de economia circular	13
Figura 2: Esquema do forno e os principais dispositivos de funcionamento	18
Figura 3: Fluxograma completo até o alto forno	19
Figura 4: Co produtos da produção do aço	22
Figura 5: Processo de obtenção de escória	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estudo sobre as reutilizações da escória	35
Tabela 2: Estudo sobre as reutilizações da escória de acordo com a economia circular.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Oportunidades na reutilização da escória	41
Quadro 2: Desafios na reutilização da escória	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema de Pesquisa	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Geral.....	14
1.3.2	Específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	ECONOMIA CIRCULAR E A SUSTENTABILIDADE	15
2.2	SIDERURGIA.....	18
2.2.1	ALTO FORNO	20
2.2.1.1	PRODUTOS GERADOS	20
2.2.1.1.1	ESCÓRIA	20
3	O cenário atual das reutilizações dos coprodutos.....	30
3.1	As reutilizações da escória	32
4	METODOLOGIA	34
5	RESULTADOS DE DISCUSSÕES	35
5.1	As reutilizações da escória do alto forno	35
5.2	A economia circular na reutilização da escória de alto forno	38
6	DESAFIOS E OPORTUNIDADES	41
7	CONCLUSÃO	43

1 INTRODUÇÃO

Com a origem da primeira Revolução Industrial, a produção em larga escala tem se tornado, progressivamente, o paradigma dominante nas indústrias globais (SOETE; FREEMAN, 2012). Isso impulsionou um incremento nos hábitos de consumo, que por consequência levou a um aumento na extração de matérias-primas. As matérias-primas, que podem ser de origem vegetal, animal ou mineral, são indispensáveis para a produção de uma variedade de produtos (SCHMIDT, 2021).

O Brasil, com seus baixos custos de produção, vasta riqueza mineral e esforços laborais, apresenta vantagem competitiva na produção de aço (MELLO, 2016). Atualmente, a mudança para uma economia circular, alimentada pelas tecnologias da Indústria 4.0, emerge como uma oportunidade para que diferentes partes interessadas, incluindo empresas, consumidores e governo se beneficiem (STOCK, 2016).

A Economia Circular é uma conduta necessária para lidar com a gestão de resíduos ambientais, tanto na extração de matérias-primas quanto no descarte de produtos utilizados, permitindo a reciclagem e reutilização dos materiais. O controle da geração e destino dos resíduos é uma maneira adicional de economizar não se trata apenas da produção de produtos, mas também da preocupação com a sua disposição apropriada após a utilização (LORA, 2000). Atualmente, a economia circular tem se tornado cada vez mais relevante, e diversas empresas e governos têm se esforçado para implementar práticas mais sustentáveis de fabricação e custos.

Assim, o valor do recurso natural extraído permanece em circulação para garantir que produtos, componentes e materiais continuem funcionando com o máximo de utilidade possível (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Portanto a questão central desse trabalho, é analisar como pode-se aproveitar a escória de alto forno. Uma vez que a indústria siderúrgica produz diversos tipos de resíduos durante o processamento produção do aço, lama e escórias provenientes do alto-forno.

1.1 Problema de Pesquisa

Quais os aproveitamentos para a escória de alto forno através da economia circular.

1.2 Justificativa

A Economia Circular, vista como um novo paradigma econômico, propõe uma forma alternativa de encarar a produção e o consumo de bens, de forma a manter constantemente em circulação os recursos utilizados. Neste sentido, a escória de alto forno, que atualmente é vista como um resíduo, poderia ser utilizada como um recurso útil.

Conforme delineado pela Ellen MacArthur Foundation (2015), é preconizado que o valor intrínseco dos recursos naturais extraídos seja mantido em circulação contínua, visando preservar a utilidade máxima de produtos, componentes e materiais em todos os momentos. Neste contexto, torna-se de suma importância abordar a otimização da aplicação da escória de alto forno dentro da perspectiva da Economia Circular.

Ainda, ao oferecer a redução da geração de desperdícios e fomentar a reutilização de materiais, estamos pavimentando o caminho para a conservação de recursos naturais, atenuação dos efeitos das mudanças climáticas e fomento de uma sociedade mais sustentável (op. cit., 2015). Dessa maneira, é vital conduzir análises aprofundadas sobre as maneiras práticas de maximizar a aplicação da escória de alto forno, bem como discernir os impactos ambientais associados ao seu manejo (VALKOKARI *et al.*, 2018).

Por outro lado, uma ampla gama de estudos e análises deverão ser realizados para investigar tecnicamente a viabilidade, as possíveis aplicações para o reaproveitamento da escória de alto forno e as implicações ambientais envolvidas, considerando-se a economia circular como modelo de gestão (EHRENFIELD, 2004).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar quais são os aproveitamentos da escória de alto forno oriundas da siderurgia, a partir da Economia Circular.

1.3.2 Específicos

- a) Abordar a implementação da economia circular nos processos de reaproveitamento da escória de alto forno;
- b) Relacionar as medidas que fundamentam a economia circular dentro dos processos industriais siderúrgicos;
- c) Determinar os benefícios da aplicação do modelo de economia circular;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ECONOMIA CIRCULAR E A SUSTENTABILIDADE

A economia circular (EC) é uma definição que associa a expansão econômica a um melhor aproveitamento de recursos oriundo, por meio do crescimento de novos modelos de negócios e da aprimoração nos processos de produção com menor impacto ambiental segundo a (CONFEDERAÇÃO NACIONAL INDÚSTRIA, 2018). Atualmente, a União Europeia (UE) tem se destacado na promoção e implementação da economia circular, reduzindo as emissões de CO₂, estimulando o crescimento econômico e criando oportunidades de emprego de acordo com o (SERVIÇO DE ESTUDOS DO PARLAMENTO EUROPEU, 2023).

Em março de 2020, a Comissão Europeia (CE) preparou o primeiro conjunto de medidas para ativar a transição para uma economia circular, conforme previsto no plano de ação para uma EC, para cumprir o objetivo da UE de atingir a normalização climática até 2050. A sustentabilidade e a circularidade devem ser incorporadas em todas as fases da cadeia de valor para alcançar uma economia totalmente circular, desde a concepção até a produção e até o consumidor final (op. cit., 2023).

A perspectiva para a UE até 2030 é de elevação da produtividade de recursos em 32% e de redução das projeções de dióxido de carbono em 48% (BORSCHIVER; TAVARES, 2022). A transição para a economia circular traz melhoras para o ambiente, o aumento econômico e a saúde humana, resultando em melhores condições de vida para a população (CONFEDERAÇÃO NACIONAL INDÚSTRIA; 2018).

O objetivo da economia circular é promover a diminuição, reaproveitamento, restabelecimento e reciclagem de objetos e energia. A economia circular é vista como uma ferramenta importante para resolver a disparidade entre o desenvolvimento econômico e o crescimento no consumo de processos. Ela funciona atualizando o conceito de extinção da economia linear por novos fluxos circulares de recuperação, reparação e reciclagem em uma ação integrada. Seu modelo une a sustentabilidade do meio ambiente com estratégias de negócios. A

transição para a aplicação da economia circular na indústria tem sido discutida como uma forma de promover a sustentabilidade e a competitividade do setor produtivo (LATIKOS, 2015).

Ela está diretamente alinhada com os processos de reaproveitamento e recuperação de produtos, com o objetivo de evitar a geração de resíduos que seriam descartados (GONZALEZ, 2018). Seu objetivo é garantir que, antes de ser descartado, um produto passe por subprocessos que o tornem adequado para ser consumido ou utilizado novamente, criando um circuito cíclico, como ilustrado na figura 1.

Figura 1: 4R's do modelo da economia circular.



Fonte: FINANCEONE, (2021)

A figura 1, descreve o andamento da economia circular:

- 1º. Reciclar: é um processo que faz parte da economia circular, um modelo de desenvolvimento sustentável que visa reintegrar todo e qualquer material à cadeia de produção e consumo.
- 2º. Refletir: é uma ação que leva à conscientização e mudança de comportamento, visando à redução do impacto ambiental.
- 3º. Reduzir: consiste em ações que reduzam o consumo de bens e serviços, visando à diminuição da geração de resíduos e consequente redução do impacto ambiental.

4º. Reutilizar: significa aplicar um produto novamente na mesma função ou em diversas outras possibilidades de uso, prolongando a vida útil deste produto.

A escassez de recursos implica na necessidade de se adotar uma abordagem circular, na qual o uso regenerativo seja prioritário para garantir a continuidade da prosperidade social. Onde é importante estar atento à variável dos custos e à velocidade com que eles se esgotam (GONZALEZ, 2018).

Como finalidades, têm-se a diminuição dos efeitos ambientais, da geração de resíduos sólidos e da quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários. Esses objetivos, são alcançados por meio de práticas como reutilização, remanufatura e reciclagem, em conformidade com a legislação ambiental e com foco na velocidade de geração de resíduos (op. cit., 2008).

Através de um ângulo econômico, a geração de rentabilidade e vantagem competitiva na Economia Circular requer uma avaliação do modelo de negócios, o desenho de produtos, o desenho da cadeia de abastecimento e a escolha de materiais. É essencial considerar a dependência de métodos escassos e a compreensão do valor dos efeitos ambientais associados a esses recursos (op. cit., 2008).

Conforme apontado por Gonçalves e Barroso (2019), os recursos materiais e energéticos utilizados na produção são finitos e estão ameaçados, o que resulta em um aumento nos preços e na volatilidade das commodities e insumos. Na Economia Circular, os recursos podem se regenerar em dois ciclos distintos: o ciclo biológico, que ocorre de forma natural com ou sem intervenção humana, e o ciclo técnico, que requer intervenção humana e energia para que a reestruturação ocorra. Esse exemplo econômico oferece novas chances de negócios, parceria, preservação e aumento do capital natural, contribuindo significativamente para a educação ambiental social, econômica e ambiental.

A prática da Economia Circular vai além do gerenciamento de resíduos e reciclagem. E busca uma abordagem mais ampla, em que produtos, componentes e materiais circulem de maneira eficiente nos ciclos técnicos e/ou biológicos (GONÇALVES; BARROSO, 2019). Ela promove novas formas de transações e relações empresariais, com foco no desempenho dos serviços e produtos

oferecidos ao consumidor. O que implica em processos renovados de reparação, manutenção, reutilização e renovação nas linhas de produção, transformando o produtor em usuário por meio de contratos e serviços (op. cit., 2019).

As empresas que adotam a Economia Circular aumentam sua competitividade ao estabelecer relacionamentos de longo prazo com clientes e fornecedores. Elas reduzem sua dependência de matérias-primas, que se surgem cada instante mais escassas e caras ao longo do tempo. Além disso, essas empresas estão mais preparadas para enfrentar adversidades futuras, transmitem uma imagem positiva para a sociedade e conseguem melhorar a qualidade e reduzir os custos de produção (op. cit., 2019).

No Brasil, como destaca (SPILKI; ARAÚJO, 2019), a implementação da economia circular na indústria enfrenta problemas ligados à falta de incentivos governamentais, à falta de capacitação técnica e à necessidade de mudanças culturais e de comportamento por parte dos consumidores e das empresas. E o fechamento de linhas das cadeias de produção está ganhando importância porque, mesmo com o aumento da aplicabilidade, a flexibilidade de muitos recursos não renováveis, como metais e biocombustível, não é suficiente para atender a demanda de recursos humanos atuais. E, a regeneração do ambiente capacitâncias de medidas renováveis, como florestas e água, é menor do que as taxas de extração desses recursos (BRAUNGART; MCDONOUGH, 2008).

2.2 SIDERURGIA

A siderurgia é uma das indústrias mais antigas e fundamentais da humanidade, sendo responsável pela fabricação de ferro e aço. Esses utensílios são amplamente aproveitados em diversas aplicações, como a construção civil e a fabricação de automóveis (STUBBLES, J., 2009).

No contexto brasileiro, a indústria siderúrgica teve seu embrião no século XX, inicialmente fomentada por investimentos privados. No entanto, foi na década de 1940, com a injeção de capital público e a fundação de empresas estatais, que o setor começou a ganhar corpo de maneira significativa, marcando a abertura de um novo ciclo de expansão na indústria siderúrgica do país (BARROS, 2015). A década de 1980, no entanto, trouxe desafios significativos, com o governo enfrentando dificuldades para manter os níveis de investimento e manutenção necessários. Isso levou à decisão de transferir a gestão dessas empresas para o setor privado, uma mudança que se evidenciou na década de 1990, quando começou o processo de privatização das siderúrgicas, trazendo um influxo significativo de capital para o setor (op. cit., 2015).

O aumento da indústria siderúrgica no Brasil ocorreu na década de 1900 e 1940 foi marcado pela formação de empresas e evolução da capacidade produtiva. A produtividade no Brasil não cresceu muito dentro dos setores econômicos, não por causa da participação de setores pouco produtivos na organização produtiva, mas sim porque a eficiência dentro dos setores econômicos cresceu pouco. A siderurgia desempenhou um papel crucial na fase da Revolução Industrial. Com o início da década de 1990, com o progresso do conceito neoliberal e a globalização dos mercados, o setor decorreu por um intenso processamento de reestruturação, incluindo privatizações, fusões e aquisições por grupos internacionais, direcionando-se cada vez mais para o mercado global (CROSSETTI; FERNANDES, 2005).

O setor siderúrgico brasileiro tem crescido nos últimos anos, com aumento da participação no mercado internacional. O Brasil ocupa a décima posição como maior produtor e o décimo primeiro como maior exportador de aço bruto no mundo, devido aos baixos custos de produção de aço no país. A riqueza mineral do Brasil, com a quinta maior reserva de minério de ferro do mundo, e o valor dos estudos no país são considerados para essa vantagem competitiva. Apesar de que a maior parte da produção siderúrgica brasileira ainda seja voltada para o mercado doméstico, os aços semi-acabados têm sido exportados em grande parcela. A produção de aço bruto do Brasil cresceu 24% no primeiro semestre de 2021, mas

as exportações reuniram retração em quantidade (INSTITUTO DO AÇO BRASIL, 2022).

A decisão das indústrias globais de redistribuir sua capacidade produtiva está relacionada ao aumento da participação das exportações em países como o Brasil, de acordo com Crossetti e Fernandes (2005) e Buhler (2007). Essa redistribuição faz com que a fase quente do processo siderúrgico seja concentrada em países periféricos, enquanto a fase fria é mantida perto dos mercados consumidores. Essa estratégia se baseia nos baixos custos de produção desses países e no posicionamento estratégico das nações mais desenvolvidas, que têm maior intensidade tecnológica e valor agregado nos produtos, além de maior flexibilidade para se ajustarem às mudanças na demanda. Além disso, a redistribuição da produção também ocorre em função de fatores políticos e institucionais, como a constituição trabalhista e ambiental menos severa nos países periféricos, e a demanda dos países industrializados de reduzirem suas emissões de dióxido de carbono (CO₂) (ANDRADE; CUNHA, 1999).

Apesar de sua importância e contribuições, a indústria siderúrgica enfrenta desafios, como implementar práticas mais sustentáveis e reduzir os efeitos negativos para o meio ambiente. A busca por alternativas mais limpas, como a mencionada injeção de gás natural, reflete o compromisso da indústria em evoluir e adaptar-se às demandas contemporâneas (LESSA, 2018).

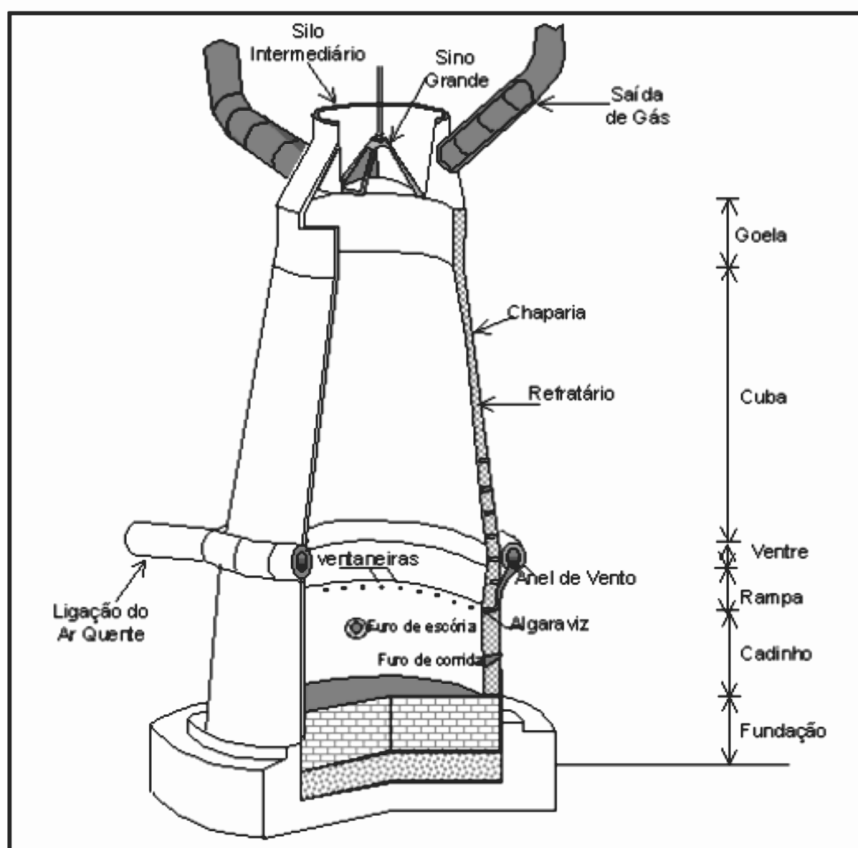
2.2.1 ALTO FORNO

O alto forno é uma unidade industrial utilizada na produção de ferro gusa, que é o produto intermediário na fabricação do aço. Com sua complexidade e

relevância, permanece como a parte essencial da siderurgia. As contínuas pesquisas e inovações em torno deste equipamento demonstram o dinamismo e a resiliência da indústria siderúrgica brasileira, pronta para enfrentar os desafios do futuro (LESSA, 2018).

Peacey (1979) classifica o corpo do alto-forno em cinco partes: cadinho, rampa, ventre, cuba e goela. A área das ventaneiras é onde o ar entra no alto-forno. A figura 2 demonstra o esquema o alto forno com suas regiões principais.

Figura 2: Esquema do Forno e os principais dispositivos de funcionamento.



Fonte: ARAÚJO, (1997).

Um reator de alto forno é um equipamento utilizado na siderurgia para produzir ferro gusa. Ele é um reator químico de tamanho variável, revestido externamente por metal e internamente com material refratário, onde acontece as reações químicas, passagem de massa e calor.

O reator é dividido nas seguintes partes:

- 1º. Cadinho: região do forno que começa na sola e termina no eixo das ventaneiras;
- 2º. Rampa: parte cônica que se estende do centro das ventaneiras até o início do ventre;
- 3º. Ventre: onde separa a cuba da rampa (alguns fornos altos não têm essa parte);
- 4º. Cuba: é a parte central do alto forno, onde ocorrem as reações químicas que modificam o minério de ferro em ferro gusa;
- 5º. Goela: parte superior cilíndrica;
- 6º. Chaparia: é uma estrutura metálica que envolve o alto forno, formando a sua carcaça;
- 7º. Refratário: é um material que resiste ao calor que é usado para cobrir as partes internas de um alto forno;
- 8º. Anel de vento: É uma atração revestida de refratário que circunda o forno, acima das ventaneiras;
- 9º. Ventaneiras: São aberturas localizadas na parte inferior do alto forno, por onde é injetado ou necessário para a combustão do coque;
- 10º. Sino grande: é uma estrutura de metal que fica acima do alto forno e coleta os gases produzidos durante a produção de ferro gusa;
- 11º. Saída de gás: é uma forma comum que leva os gases coletados pelo sino grande para a unidade de recuperação de energia, onde o calor dos gases é utilizado para gerar vapor e eletricidade;
- 12º. Silo intermediário: é um equipamento utilizado para armazenar o ferro gusa produzido pelo alto forno antes de ser transportado para a aciaria;
- 13º. Furo de escória: é um furo localizado na parte inferior do alto forno, por onde a escória é retirada;
- 14º. Furo de corrida: é um furo localizado na parte inferior do alto forno, por onde o ferro gusa é retirado;
- 15º. Ligação de ar quente: é um sistema de tubulações que leva o ar quente produzido pelos regeneradores até as ventaneiras do alto forno;
- 16º. Fundação: é a base estrutural do alto forno, que suporta todo o peso do equipamento e das cargas que estão inseridas;

Por meio de inúmeras reações físico-químicas o minério de ferro é queimado e modificado, o produto destas reações após chegar ao estado líquido, o material é carburado, relativamente dessulfurado e incorpora sobretudo manganês, fósforo e silício (McLEAN, 2002).

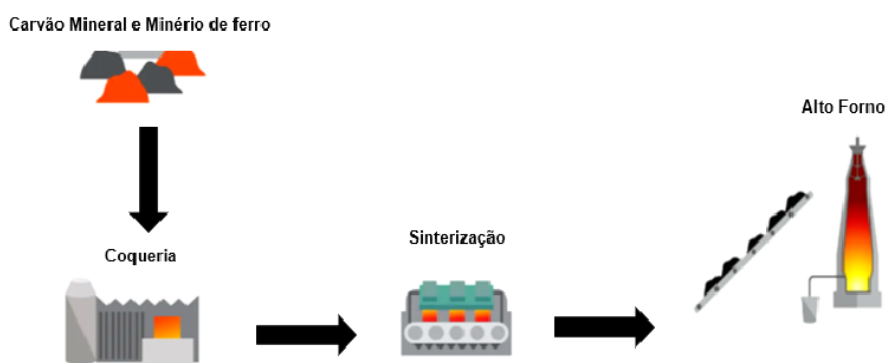
Quando os insumos são ricos em carbonatos, por volta de 800° C, ocorrem reações específicas que resultam na formação de dióxido de carbono (CO₂) (MOTHÉ, 2008). Ao atingir a zona da rampa, onde as temperaturas são mais intensas, ocorrem reações que levam à formação do ferro líquido. Finalmente, o cadinho é a seção destinada principalmente para armazenar o ferro líquido e a escória (op. cit., 2008).

De acordo com Silva (2016), os resíduos siderúrgicos recicláveis são categorizados em três grupos: aqueles que contêm ferro, os resíduos carboquímicos e as escórias. Mothé (2008) afirma que "poeiras e lamas de alto-forno, lamas de aciaria e sinterização, lamas das unidades de tratamento e recirculação da água das laminações, e carepas" estão incluídas na categoria de resíduos recicláveis ricos em ferro.

O alto forno opera através da diminuição do minério de ferro, um processo que envolve a remoção de oxigênio do minério para produzir ferro gusa. Para isso, são inseridos no topo do forno o minério de ferro, coque (um tipo de carvão) e calcário. O coque é queimado, gerando o calor necessário para a redução do minério, enquanto o calcário atua como agente fundente, auxiliando na remoção de impurezas e formando a escória, um subproduto que é posteriormente removido (SIQUEIRA, 2015).

Conforme ilustrado na figura 3, pode-se observar o funcionamento do alto forno de uma siderurgia da seguinte forma:

Figura 3: Fluxograma inteiro até o alto forno.



Fonte: VIKA, (2023).

O pátio de matérias-primas da usina siderúrgica é onde as matérias-primas e insumos são recebidos, beneficiados em granulometria, guardados e misturados para a produção de aço. As matérias-primas são, minério de ferro, carvão mineral e calcário.

Coqueria é uma planta com fornos horizontais, onde o carvão mineral é submetido a temperaturas altas na ausência de O_2 (Oxigênio), liberando gases e produzindo coque, um resíduo sólido e poroso (LOISON, *et al.*, 1989).

O processo de sinterização é um dos processos mais importantes na fabricação de aço. Nesse processo, minérios de ferro e outros materiais são aglomerados em sinter, um material poroso que é usado como matéria-prima nos altos-fornos.

O alto-forno é uma estruturação em forma de torre, onde ocorre a combustão do coque, produzindo calor intenso que funde o minério de ferro. Esse calor também proporciona a redução do minério, convertendo-o em ferro líquido.

Após o alto-forno, a escória é drenada para potes ou transformada para ser comercializada. O ferro gusa segue para o refino primário no conversor, onde há reações de oxidação. Em seguida, há o refino secundário na panela. Em ambas as etapas de refino, as propriedades são ajustadas e o ferro-gusa é transformado em aço (MOURÃO, *et al.*, 2007).

2.2.1.1 PRODUTOS GERADOS

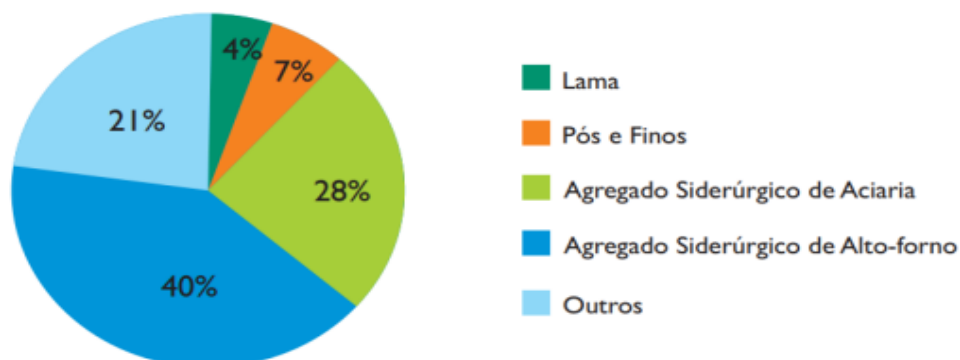
Durante o processo de transformação do minério em ferro gusa, uma série de produtos e subprodutos que têm relevância tanto na indústria siderúrgica quanto em outras áreas são gerados (GOMES *et al.*, 2018). Na indústria siderúrgica, a geração e o manejo de subprodutos, como lama, pós, finos e agregados siderúrgicos, provenientes de aciarias e altos fornos, são aspectos cruciais que têm sido objeto de estudos e pesquisas intensivas.

A lama é um resíduo semi-líquido, geralmente resultante do tratamento de gases e efluentes, contendo partículas finas de minério e outros compostos (GOMES *et al.*, 2022). O pó do alto-forno, por outro lado, é feito principalmente de óxidos metálicos e objetos carbonosos. O pó do alto-forno é um coproduto resultante da limpeza dos gases produzidos no interior do alto-forno. Segundo Mourão *et al.*, (2011), uma tonelada de ferro-gusa produz entre dez e quinze quilos de pó do alto-forno.

Além disso, os agregados siderúrgicos são subprodutos sólidos que surgem tanto em aciarias quanto em altos fornos, sendo constituídos por materiais como escória, que têm potencial de reutilização em diversas aplicações, inclusive na construção civil. Em particular, a escória de alto forno, quando granulada e moída, demonstrou ter propriedades físico-mecânicas favoráveis para a incorporação em argamassas, contribuindo para a produção de materiais de construção mais sustentáveis e inovadores (ALMEIDA, 2009).

A figura 4 demonstra os coprodutos gerados na produção do aço em 2021.

Figura 4: Geração de coprodutos e resíduos por tipo.



Fonte: Instituto Aço Brasil, (2022).

Como ilustrado na figura acima, os coprodutos gerados em maior quantidade são os Agregado Siderúrgico de Alto-Forno com 40%, depois os Agregado Siderúrgico de Aciaria com 28%, outros coprodutos (21%), e com menos de 7% os Pós e Finos e a Lama com 4%.

Para que os resíduos da siderurgia sejam transformados em coprodutos, é necessário o desenvolvimento de tecnologias que permitam sua aplicação como insumo ou fonte de energia no mesmo processo ou em outros processos. Atualmente, a escória granulada de alto-forno é vista como coproduto e tem sua aplicação principal na produção de cimento Portland (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022; ARCELORMITTAL, 2023).

Um dos resíduos com maior dificuldade de gerenciamento é a lama de alto-forno, que representa uma composição de cerca de 4% dos resíduos sólidos totais das siderúrgica. A lama é um material heterogêneo gerado pelo processo de lavagem da poeira do gás do alto-forno de acordo com (TRINKEL *et al.*, 2016) e a formação pode variar consideravelmente conforme a matéria-prima utilizada no método de produção (LOBATO; VILLEGAS; MANSUR, 2013).

Visando processos de reaproveitamento e reciclagem, fazem-se necessárias informações sobre o conteúdo total e a distribuição dos elementos presentes na lama do alto-forno, sendo que uma parte significativa das guseiras não dispõe de tais dados, o que dificulta processos voltados a uma destinação ambiental adequada (VIEIRA *et al.*, 2007).

O pó de alto-forno, também conhecido como pó do balão coletor, é o material particulado seco que é retirado dos efluentes gasosos do alto-forno e armazenado em um sistema de limpeza a seco de gases. Suas taxas de geração variam de 20 kg/t a 45 kg/t de gusa (JACOMINO *et al.*, 2002; OLIVEIRA, MARTINS, 2003). É principalmente composto de materiais carbonosos e óxidos metálicos.

Este resíduo sólido tem altos teores de carbono devido à injeção de carvão pulverizado com uma combustibilidade ineficaz e de uma atividade instável do alto-forno (MACHADO, 2011).

O agregado siderúrgico de aciaria (escória) é um coproduto gerado no refino da produção de aço nas aciarias. Ele pode ser utilizado em diversas aplicações na

construção civil, como pavimentação, produção de tijolos e blocos e em concreto (BRUN; YUAN, 1994). O reaproveitamento do agregado vantagens econômicas e ambientais. O uso de agregados siderúrgicos pode melhorar as propriedades mecânicas do concreto e reduzir a quantidade de resíduos gerados pela indústria siderúrgica.

Agregado siderúrgico de alto forno, também conhecido como escória, é um resíduo siderúrgico não metálico produzido principalmente no processo de produção de ferro gusa. É formado pela combinação de canga, ou impurezas, de minérios de metal com fundentes adequados e cinzas de carvão usadas. Contém essencialmente silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos (ALMEIDA, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A aplicação da escória de alto forno com estrutura cristalina é semelhante à escória de aciaria, com capacidade de recuperação como insumo para geração de lastro ferroviário ou até mesmo como agregado para pavimentação (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

A produção do aço gera outros 21% de coprodutos que podem ser reaproveitados em outros setores ou em processos internos. A sucata forjada gerada no processo de forjamento de peças de aço, possui níveis variáveis de elementos de liga residual, especialmente cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e vanádio (V) (ABNT NBR 16229, 2013). Devido a essa característica é muito utilizado na indústria de aços especiais, podendo economizar em ferro-liga em etapas posteriores de fabricação.

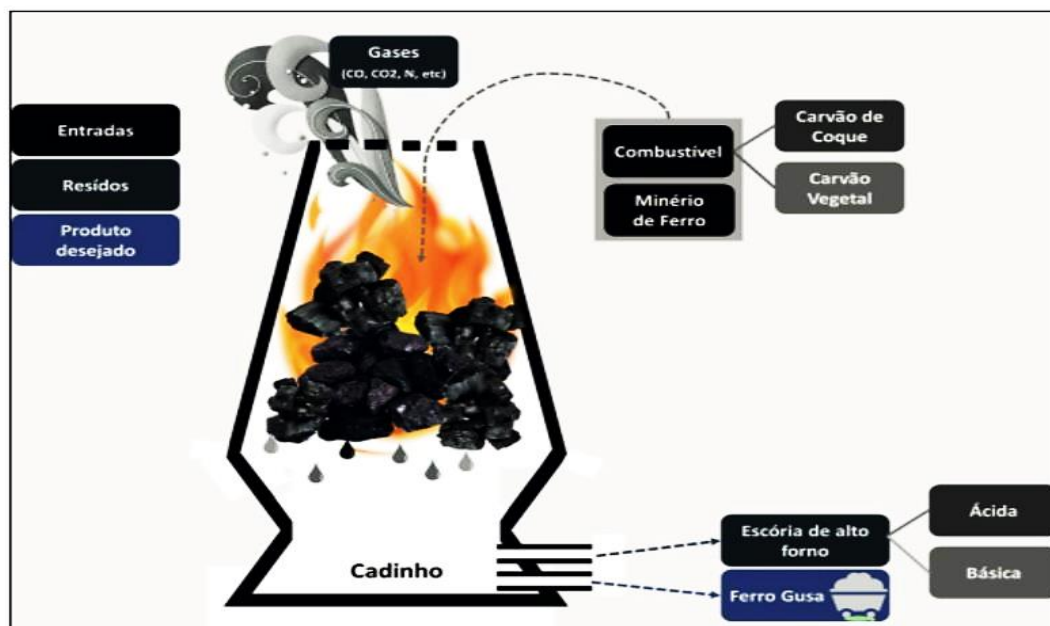
2.2.1.1.1 Escória

Devido a sua grande capacidade de reprocessamento como matéria-prima ou insumo para vários processos, como as escórias siderúrgicas, que historicamente eram consideradas resíduos sólidos, ganharam um novo significado nos mercados globais (FONSECA, 2010).

De acordo com Silva (2006), a escória é composta majoritariamente por óxido de magnésio (MgO), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de silício (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO), que juntos representam cerca de 95% de sua composição. Além disso, óxidos de manganês (MnO) e ferro (Fe) também estão presentes, mas em menor proporção. A composição química da escória, juntamente com o método de resfriamento utilizado, influencia diretamente suas propriedades físicas, como densidade, porosidade e granulometria (op. cit., 2006).

A Figura 5 ilustra o processo de obtenção de escória.

Figura 5: Processo de obtenção de escória.



Fonte: NEHRING *et al.* (2021).

O alto forno, que pode usar principalmente dois tipos de combustíveis, é onde começa o processo produtivo. O coque produzido pelo aquecimento do carvão mineral ou o carvão vegetal extraído de florestas plantadas. O aquecimento ocorre entre 900 e 1200 °C quando a mistura de combustível e minério de ferro

entra nos altos fornos. A liquefação do minério de ferro e o gotejamento do líquido de gusa são causados pelas altas temperaturas; esse líquido cai no fundo do cadinho no lado inferior do forno, produzindo escória (NEHRING *et al.*, 2021).

Liduário *et al.*, (2004) enfatizam que a composição química da escória está intrinsecamente ligada a fatores como a qualidade do minério de ferro, a escolha do fundente, o tipo de combustível utilizado (seja coque ou carvão vegetal) e outros aspectos do processo.

A escória de alto-forno é um dos subprodutos mais volumosos gerados na siderurgia, com uma produção estimada entre 210 e 310 kg para cada tonelada de ferro gusa preparado. Dada a grande quantidade produzida, é essencial encontrar formas de reutilizar esse material (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

Quando uma escória de alto-forno fundida é resfriada rapidamente pela imersão em água, ocorre a formação de um produto vítreo ou não-cristalino conhecido como escória granulada. Devido às dimensões das partículas, é chamado de granulado. A escória peletizada ocorre quando o resfriamento é ágil e ao ar e com pouca água (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Resultado da mistura de minerais da canga de minério de ferro, cinzas de carvão mineral (coque) ou carvão vegetal e calcário utilizado como fundente em altas temperaturas. É feito de uma mistura de alumina, sílica e cal, que são os mesmos óxidos que compõem o cimento Portland, mas em proporções diferentes (FONSECA, 2006)

3 O cenário atual das reutilizações dos coprodutos

A reutilização de recursos provenientes da produção de ferro na siderurgia tornou-se um assunto importante em um mundo onde as pessoas estão cada vez mais cientes dos efeitos que as práticas sustentáveis têm no meio ambiente. A indústria siderúrgica, responsável por uma parcela significativa da produção industrial global, gera grandes volumes de resíduos, como escória, lama de alto-forno e poeira. A gestão adequada e a reutilização desses materiais não só diminuem o impacto ambiental, mas também dão oportunidades econômicas (SMITH *et al.*, 2015).

Segundo a World Steel Association (2010), os coprodutos siderúrgicos podem ser reciclados durante o processo de produção de aço ou vendidos para uso por outras indústrias. A utilidade dos coprodutos promove a sustentabilidade da indústria siderúrgica, minimiza a disposição de materiais em aterros sanitários, reduz as emissões de CO₂ e ajuda a preservar os recursos naturais.

A lama de alto-forno, rica em ferro e carbono, tem potencial para ser reutilizada em várias aplicações. Na Índia, por exemplo, estudos têm explorado sua utilização como material alternativo no tratamento de efluentes industriais e em aplicações agrícolas, aproveitando seu alto teor de ferro (KUMAR; KUMAR, 2017).

De acordo com os estudos realizados por (VIEIRA *et al.*, 2007), a lama de alto forno possui granulometria apropriada para incorporação em cerâmica vermelha. A composição química do resíduo é semelhante ao da argila, o que facilita sua incorporação. A integração do resíduo colabora para a economia energética no decorrer da fase de queimação da cerâmica, por conta da combustão dos finos de coque presentes na lama. Para reduzir os efeitos negativos nas características físicas e mecânicas da cerâmica, a dispersão deve ser incorporada em percentuais abaixo de 5% do peso.

A incorporação aumenta a quantidade de hematita presente na cerâmica, melhorando a cor avermelhada e conferindo às peças cerâmicas um valor estético. Os 25 elementos tóxicos encontrados no descarte são inertizados ao incorporar porque os testes de solubilização e lixiviação funcionaram bem na análise ambiental (op. cit., 2007), garantindo que a reciclagem de lama em cerâmica argilosa é tecnicamente viável.

O pó do alto-forno é um coproduto produzido pelo processo de limpeza a seco dos gases do alto-forno que são gerados durante o processo de fabricação da ferro-gusa. Embora o pó de alto forno seja composto principalmente de óxidos metálicos e materiais carbonosos, depende dos materiais primários utilizados no alto forno.

Castro *et al.*, (2016) criaram blocos de solo-cimento para utilização em alvenaria sustentável usando os coprodutos siderúrgicos: pó do alto-forno, pó de aciaria elétrica e escória granulada em alteração parcial ao solo. Fora os coprodutos, as elaborações incluem agregação conjunta de blocos de solo-cimento defeituosos finamente granulados. As análises indicaram que os coprodutos siderúrgicos podem ser usados em blocos de solo-cimento. Os resultados foram notados quando se aproveitou 20% de pó do alto-forno juntamente com 10% de reuso do bloco solo-cimento; 10% de escória de aciaria ou 20% de escória de aciaria juntamente com 10% de reuso do bloco solo-cimento; e 2,5% de pó de aciaria junto com 20% de reuso do bloco solo-cimento.

A escória de alto forno provém da execução de diminuição dos óxidos ferrosos, nos altos fornos, trazendo uma densidade menor que o ferro gusa, insumo da fabricação de aço (BRANCO, 2004).

A aplicabilidade da escória de alto forno hoje representa à fabricação de cimento, na qual é usada como insumo e traz vantagens não só as cimenteiras, mas ainda a própria empresa formadora, se tornando um coproduto. Rizzo (2005) cita a importância e a necessidade da aplicação do granulador de escória, onde será resfriada tornando-as formatos de pequenos grãos e dessa forma agregando custo ao resíduo que poderá ser comercializado e servirá de insumo, que é a principal finalidade e para produção de catalisadores, e pastilhas de freio.

Globalmente, a reutilização de resíduos siderúrgicos também tem implicações sociais. A transformação desses resíduos em produtos de valor agregado pode gerar empregos e promover o desenvolvimento sustentável em regiões siderúrgicas (MARTINEZ; BLANCO, 2019).

3.1 As reutilizações da escória

Através dos impactos ambientais, a adoção de práticas de reutilização de resíduos na indústria siderúrgica tem se tornado preocupações mundiais. A reutilização da escória é uma forma de reduzir o impacto ambiental dos processos metalúrgicos e siderúrgicos, além de gerar benefícios econômicos para as empresas que seguem essa realidade.

Algumas das possíveis reutilizações da escória incluem a ativação pela adição de fontes secundárias de alumina, a reciclagem como matéria-prima em processos metalúrgicos e siderúrgicos, a reutilização como agregado em concreto e argamassa, a recuperação energética como combustível em fornos de cimento e a reutilização na fabricação de aço como agente redutor de oxigênio e enxofre. A aplicação dessas reutilizações depende das propriedades específicas da escória e das necessidades da indústria em questão.

A incorporação da escória de alto-forno pode melhorar significativamente as características do concreto, tanto fresco quanto endurecido (MOURA, 2000).

A escória, rotineiramente utilizada na produção de cimento, pavimentação de estradas e outras atividades de construção, tem potencial para ser empregada na recuperação de terrenos industriais e como material de construção alternativa, consequentemente diminuindo a necessidade de extração e processamento de novos materiais, minimizando ainda mais os impactos ambientais (SMITH *et al.*, 2015).

De acordo com Costa e Filho (2004), no estudo do aproveitamento da escória de alto forno para produção de material cerâmico, pode perceber que é possível a fabricação de telhas, tijolos de alvenaria e tijolos furados, a partir da mistura argila-escória. A utilização de escória misturado à argila para fabricação de produtos cerâmicos é tecnicamente viável, demonstrando também possibilidade para ser uma escolha eficiente na diminuição de problemas de poluição.

Revestimento primário com escória de alto forno é uma técnica utilizada em estradas não pavimentadas. A técnica é baseada no regulamento brasileiro DNIT nº 141/2010, que aborda a pavimentação por base estabelecido granulometricamente, ou revestimento primário.

Segundo o estudo (MEDEIROS *et al.*, 2019) à utilização de resíduos industriais siderúrgico e escória, respectivamente, viabilizou resultados positivos na construção do revestimento primário, a fim da diminuição de defeitos estruturais recorrentes em ruas não pavimentadas e não revestidas.

A construção do revestimento se mostrou economicamente viável quando comparado aos custos de manutenção de estradas não revestidas, no que tange a utilização de máquinas e equipamentos em horas. Além da melhoria de estradas, o estudo contribui para a prevenção da poluição ambiental uma vez que, além de se usar de rejeitos que anteriormente seriam descartados, auxilia também na redução de manutenções corretivas e preventivas de veículos associados ao desgaste provocado por pistas mal estruturadas, e gasto expedidos de combustíveis. Em âmbito social, estradas bem estruturadas também previnem a ocorrência de acidentes de trânsito causados por má qualidade da pista (op.cit., 2019).

Sendo assim, a reutilização da escoria de alto forno pode trazer benefícios econômicos e ambientais, reduzindo a quantidade de resíduos gerados pelas siderúrgicas e contribuindo para a produção de materiais de construção mais sustentáveis.

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada nesse trabalho é a revisão bibliográfica. Esse método é caracterizado pelo uso de técnicas explícitas e estruturadas para coletar e sintetizar informações, com o intuito de abordar uma questão de pesquisa específica. Ele permite uma avaliação crítica e abrangente do tema em questão, consolidando os resultados de estudos anteriores por meio de uma análise retrospectiva. Além de fornecer uma análise crítica rigorosa do conteúdo estudado, otimizando a busca por informações e visando alcançar um conjunto abrangente de resultados relevantes (GIL, 2010).

Conforme especialistas no campo, o ponto de partida para desenvolver uma revisão sistemática é estabelecer a questão central, que precisa ser precisa e bem estruturada para guiar uma investigação científica robusta (Galvão *et al.*, 2019).

Nesse trabalho foram analisados estudos que mostram a aplicação da economia circular no reaproveitamento de escória de alto forno. Com isso, publicações especializadas em economia circular, reaproveitamento dos coprodutos siderúrgicos, relatórios, artigos e dissertações especializadas no assunto compõe o arsenal estudado.

Os resultados encontrados apontaram em como a escória de alto forno pode ser utilizada de maneira alternativa para insumos de baixo consumo, sendo assim para o revestimento primário em estradas não pavimentada e na utilização de agregado para concretos, argamassas e na correção de acidez no solo.

5 RESULTADOS DE DISCUSSÕES

5.1 As reutilizações da escória do alto forno

No Brasil, as escórias são normalmente usadas como base ou sub-base rodoviária, mas na Europa são frequentemente usadas para construir camadas asfálticas (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

A escória de alto forno, por sua natureza cristalina, compartilha aplicações similares com a escória de aciaria, sendo reutilizável na confecção de lastros ferroviários e como agregado em pavimentações, mediante processos de britagem, resfriamento controlado, separação magnética, classificação por tamanho e estabilização volumétrica, conforme estabelecido por normativas técnicas (op.cit., 2008).

As aplicações da escória de alto forno podem ser usadas como agregado graúdo ou miúdo em concretos como mostra na Tabela 1.

Tabela 1: Estudos sobre a reutilização da escória do alto forno.

Autores	Reutilização da escória	Estudo
Moura (2000)	Agregado graúdo	As escórias de alto forno quando resfriada vagorosamente podem ser moídas e graduadas para uso como agregado miúdo ou britadas para serem usadas como agregado graúdo.
Ariivabeni <i>et al.</i> (2007)	Agregado para concreto	Apesar da dissemelhança do subproduto, a escória de alto forno tem um grandioso efeito de uso como agregado para concreto.
Neville (1997)	Melhorias nas características do concreto	A adição de escória de alto-forno pode trazer melhorias nas características do concreto, em estado fresco e endurecido. A junção é mais coesiva e fluida, pois possui melhor distribuição de partículas em superfícies mais lisas, que absorvem pouca água. Logo, proporciona lenta perda de calor, devido à velocidade das reações de hidratação, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos em longo prazo.

Silva (2009)	Substituição de cimentos tradicionais por escória de alto forno em argamassas.	Substituição parcial de cimentos tradicionais, como o CII-F e CII-Z, por escória de alto forno em argamassas adesivas tipo AC-I, empregadas na fixação de revestimentos cerâmicos. A substituição, variando entre 5% e 20%, não apenas manteve a viscosidade e manuseio da argamassa, mas incrementou a trabalhabilidade, com uma performance satisfatória na resistência e tempo de secagem, exceto nas misturas com cal.
Costa <i>et al.</i> (2004)	Escória moída como substituto para cimento	A escória de alto forno moída como substituto parcial para cimento em concretos tradicionais e compactados, onde os concretos com escória superaram os padrões de referência em resistência à compressão e permeabilidade.
Ribeiro <i>et al.</i> (2006)	Agregado miúdo	De acordo com os traços e testes, os pesquisadores chegaram à conclusão de que a escória atende de forma geral às necessidades do concreto em termos de resistência e durabilidade.

Fonte: Autora (2023).

O potencial da escória como substituto para agregados tradicionais foi realçado por Ferreira *et al.*, (2007), embora Souza (2006) e Barbosa (2008) apontem a escassez de escória pelotizada no Brasil, em contraste com sua ampla utilização em países como Inglaterra e Canadá.

Lima (2006) e Castro *et al.*, (2006) corroboram a viabilidade de escórias resfriadas lentamente como agregados em concretos. Esses estudos, juntamente com Silva (2009) e Costa *et al.*, (2004), evidenciam a escória como substituto viável para cimentos tradicionais, ressaltando melhorias na trabalhabilidade e resistência à compressão.

A principal vantagem do uso de escória de alto-forno na fabricação de concreto é a melhor trabalhabilidade que resulta da melhor dispersão das partículas de cimento, o que aumenta a mobilidade e a coesão da mistura. Por terem uma microestrutura mais densa, os concretos com escória perderão sua resistência ascendente e sua permeabilidade e porosidade com o tempo. (NEVILLE, 1997).

A dualidade dos resultados sugere a necessidade de pesquisas adicionais para otimizar a proporção de escória em misturas de concreto. A escassez de escória pelotizada no Brasil, contraposta à sua utilização em outros países, indica um campo pouco explorado no contexto nacional.

Os estudos de LIMA (2006) e CASTRO *et al.*, (2006), ampliam as perspectivas para a utilização de escórias resfriadas lentamente como agregados, demandando atenção adicional. Dessa maneira, a escória de alto forno se configura como um material de grande potencial de reutilização, contudo, ainda carente de estudos complementares para a padronização e otimização de suas aplicações.

Consequentemente, os estudos apresentaram que a escória pode ser aplicada como agregado graúdo e miúdo para concreto, em bases para equipamentos, na fabricação de argamassa e na correção da acidez do solo.

Além disso, a reciclagem e a reutilização da escória podem trazer benefícios econômicos como, redução de custos na produção de materiais de construção, criação de materiais de construção alternativos, diminuição do custo da construção e possibilidade de utilização em larga escala. Já os benefícios ambientais, seria a redução de resíduos gerados pela indústria siderúrgica, diminuição do impacto ambiental negativo na fabricação do cimento e a diminuição dos custos de recursos naturais não-renováveis.

Contribuindo assim para a sustentabilidade da indústria siderúrgica e da construção civil. A escória de alto forno é considerada um material pozolânico, o que significa que pode melhorar as propriedades do concreto, como a resistência à compressão, mesmo quando realizada grandes quantidades de substituição

Apesar disso, é indispensável analisar cada caso individualmente e considerar as características específicas da escória e do material a ser produzido. Pois, conclui-se que o reaproveitamento da escória de alto forno pode trazer diversos benefícios, mas é necessário avaliar cada caso individualmente e considerar as características específicas da escória e do material a ser produzido.

5.2 A economia circular na reutilização da escória de alto forno

A economia circular na indústria siderúrgica tem sido amplamente discutida e reconhecida por seus benefícios significativos. Em um mundo com uma população crescente, a gestão eficiente de recursos naturais finitos é crucial. A indústria do aço, em particular, tem potencial para demonstrar os benefícios da reciclagem, promovendo a eficiência ótima dos recursos e abandonando o modelo linear tradicional de pegar, fazer, consumir e descartar BROADBENT (2016).

Além disso, EBERHARDT *et al.*, (2019) ressaltam que a indústria da construção, uma grande consumidora de produtos siderúrgicos, tem um papel vital na promoção da economia circular. A reutilização de materiais e a implementação de práticas sustentáveis podem minimizar o consumo de recursos e a produção de resíduos.

Dentro do contexto da economia circular, percebe-se uma combinação de vantagens, desafios e oportunidades, que variam conforme as circunstâncias específicas de cada empresa. Um dos pilares da economia circular é a eficiência do sistema corporativo ou da cadeia de fornecimento como um todo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2018).

A economia circular prioriza a minimização da eliminação de recursos, a criação de processos mais eficientes e a maximização da reutilização. Os coprodutos gerados nas indústrias devem ser desenvolvidos considerando um reaproveitamento que os mantenha no ciclo produtivo, para que possam ser utilizados na própria indústria geradora ou em outras (VAN BELLEN, 2003).

DIAS (2010) destaca que dos cinco princípios centrais da sustentabilidade, dois são particularmente influenciados pelas escolhas individuais: a reeducação dos hábitos de consumo e o replanejamento do que é consumido.

A reeducação dos hábitos de consumo pode ser aplicada na siderurgia por meio da busca por tecnologias que permitam utilizar fontes de energia menos poluentes, da redução do consumo de produtos e da reciclagem de resíduos gerados na cadeia produtiva.

O replanejamento do que é consumido pode ser realizado por meio da escolha de produtos desenvolvidos a partir de práticas mais sustentáveis, como a reutilização da escória de alto forno em materiais de construção, auxiliando para a diminuição do impacto ambiental e para a promoção da economia circular.

Conforme destacado STAHEL, (2016) a economia circular oferece inúmeros benefícios tangíveis e intangíveis para a indústria siderúrgica, tornando-se uma abordagem importante para o futuro do setor como, a reutilização da escória de alto forno pode resultar em economias significativas, uma vez que os materiais são reintegrados no processo produtivo, evitando a necessidade de adquirir novas matérias-primas, o que está em linha com os princípios da economia circular.

Na Tabela 2, podemos a reutilização da escória de alto forno de acordo com a economia circular e seus benefícios.

Tabela 2: Estudos sobre as reutilizações da escória de acordo com a economia circular.

Autores	Reutilizações da escória de acordo com a economia circular	Benefícios
Worrel <i>et al.</i> (2010).	A reciclagem da escória consome menos energia em comparação com a produção de novos materiais a partir de minérios brutos, colaborando assim para a eficiência energética e redução da pegada de carbono.	Geração de receita com venda de escória para outras indústrias.
Geissdoerfer <i>et al.</i> (2017).	A incorporação de práticas de economia circular na gestão da escória de alto forno pode levar a uma redução significativa de resíduos, minimizando os impactos ambientais e os custos associados à gestão de resíduos.	Redução de custos com disposição de resíduos, já que a escória pode ser reaproveitada em novos produtos.
Korhonen <i>et al.</i> (2018).	A escória de alto forno, que antes era vista como um resíduo, pode ser valorizada e transformada em novos produtos ou reintroduzida em diferentes etapas do processo produtivo.	Redução de custos com aquisição de novos agregados naturais, já que a escória pode ser utilizada como substituto.
Lacy e Rutqvist (2016).	Empresas que adotam práticas de economia circular na gestão da escória de alto forno podem melhorar sua imagem corporativa, sendo vistas de forma mais positiva por stakeholders.	Estímulo à inovação, já que uma economia circular exige novas soluções e tecnologias.

Bocken <i>et al.</i> (2016).	A busca por soluções circulares na gestão da escória de alto forno pode introduzir a inovação, levando ao crescimento de novos processos de produção e modelos de negócios	Atração de novos clientes e investidores, que valorizem empresas com práticas sustentáveis.
Webster (2015).	A reutilização da escória de alto forno através de práticas circulares, pode aumentar a resiliência das empresas às flutuações de mercado, reduzindo a dependência de matérias-primas virgens.	Aumento da competitividade, já que a economia circular pode gerar novos negócios e oportunidades.
Ghisellini <i>et al.</i> (2016).	A adoção das práticas circulares na gestão da escória de alto forno, podem facilitar o cumprimento de regulamentações ambientais mais rigorosas, evitando multas e promovendo relações positivas com órgãos reguladores.	Melhoria da imagem da empresa, já que a reutilização da escória pode ser vista como uma ação sustentável.

Fonte: Autora (2023).

A escolha de produtos desenvolvidos a partir de práticas mais sustentáveis, como a reutilização da escória de alto forno, contribui para a redução do impacto ambiental e promove a economia circular.

No entanto, a transição para práticas circulares na gestão da escória de alto forno apresenta desafios, incluindo a necessidade de inovação contínua, adaptação a um ambiente regulatório em evolução e a busca por tecnologias que permitam uma gestão eficiente dos recursos e a reciclagem dos resíduos gerados na cadeia produtiva. Portanto, a economia circular, ao promover a reutilização da escória de alto forno, não apenas propicia uma gestão mais sustentável e eficiente dos recursos, mas também abre caminhos para a inovação, fortalecendo a resiliência das empresas e contribuindo para um futuro mais sustentável para a indústria siderúrgica.

6 DESAFIOS E OPORTUNIDADES

A Economia Circular oferece uma oportunidade significativa para a indústria brasileira de expandir seu potencial de manufatura. Contribuindo assim para a resiliência dos negócios e para sua competitividade com sustentabilidade.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias a economia circular abre portas para a inovação tecnológica, incentivando a criação de processos que podem transformar resíduos, como a escória de alto forno, em recursos valiosos. KORHONEN *et al.*, (2018) destacam que esta transição pode levar ao desenvolvimento de novos produtos e modelos de negócios, potencializando a valorização de subprodutos que anteriormente eram descartados.

Uma das principais oportunidades está apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1: Oportunidades na reutilização da escória.

Substituição de agregado	Estudos realizados por (SCANDIUZZI; BATTAGIN, 1990) compararam argamassas com areia natural e argamassas com escória de alto-forno como agregado miúdo. Os estudos revelaram que, nas primeiras idades, as argamassas produzidas com escória tiveram menor resistência à colaboração, mas essa diferença vai diminuir com o tempo.
Revestimento de estradas	Passeto (2010) estudou a utilização da escória como substituto de agregados naturais na composição de base e concreto de asfalto para pavimentos flexíveis na Itália, tendo observado que todos os testes apresentaram melhores características mecânicas do que as dos asfaltos correspondentes com agregado natural e satisfizeram os requisitos de aceitação nas normas técnicas do setor rodoviário italiano, apresentando-se adequado para uso na construção de estradas.

Fonte: Autora (2023).

A reciclagem de resíduos, como escória de alto forno, é um dos maiores desafios atualmente, e quando não há forma de minimizar sua geração, deve ser incorporada como uma opção.

Os principais desafios estão apontados no Quadro 2:

Quadro 2: Desafios na reutilização da escória.

Questões Técnicas	A implementação de tecnologias avançadas para a reutilização eficiente da escória pode encontrar barreiras técnicas significativas. Segundo WORRELL <i>et al.</i> , (2010), a pesquisa e o desenvolvimento contínuos são essenciais para superar essas limitações, promovendo a integração eficaz da escória em diversos processos produtivos, o que pode, inclusive, levar a uma maior eficiência energética.
Adaptação do Mercado	A inserção de produtos derivados da escória no mercado pode encontrar resistência inicial. LACY e RUTQVIST (2016) destacam que as empresas que adotam práticas circulares são vistas de forma mais positiva pelos stakeholders, o que pode ser uma estratégia para incentivar a aceitação de produtos reciclados no mercado, criando uma imagem corporativa mais responsável e inovadora.
Regulamentações e Normas	A conformidade com as normas e regulamentações vigentes pode representar um desafio significativo. GHISELLINI <i>et al.</i> , (2016) ressalta a necessidade de uma colaboração mais estreita com as autoridades reguladoras para facilitar a integração da economia circular na indústria siderúrgica. Além disso, WEBSTER (2015) aponta que a economia circular pode ajudar as empresas a se tornarem mais resilientes às flutuações de mercado, reduzindo a dependência de matérias-primas virgens, o que pode ser um incentivo adicional para superar as barreiras regulatórias.

Fonte: Autora (2023).

7 CONCLUSÃO

A economia circular é uma concepção que tem ganhado cada vez mais espaço no mundo, e a utilização de coprodutos em outras cadeias produtivas é uma prática que tem se mostrado eficiente na diminuição do impacto ambiental e na gestão eficiente do uso de recursos naturais. As práticas de aplicação da economia circular na reutilização da escória de alto forno têm um potencial significativo para reduzir o impacto ambiental e promover uma gestão eficiente do uso de recursos naturais. Algumas estratégias que podem ser adotadas incluem redução, reutilização, recuperação e reciclagem da escória.

As perspectivas de futuro para o reaproveitamento da escória de alto forno na economia circular são bastante promissoras, já que o reaproveitamento da escória de alto forno pode gerar diversos coprodutos com diferentes finalidades, contribuindo para a sustentabilidade da indústria siderúrgica e de outras indústrias que utilizam a escória como matéria-prima.

Dentre os produtos oriundos do reaproveitamento da escória de alto forno, destacam-se o cimento, o concreto e a argamassa, a massa cerâmica e a correção da acidez do solo. Além disso, o surgimento de materiais de construção alternativos proporciona a redução no custo da construção, fator considerável quando se reconhece o déficit habitacional existente no Brasil.

Com base nos estudos apresentados nos resultados da pesquisa, é possível concluir que o reaproveitamento da escória de alto forno juntamente com a aplicação da economia circular apresenta um grande potencial de reciclagem e pode gerar produtos com menor impacto ambiental e maior sustentabilidade da indústria siderúrgica e de outras indústrias que aproveita a escória como matéria-prima.

Por fim, depois desse estudo sugere-se trabalhos futuros utilizando as ferramentas de controle de qualidade, já que pode melhorar a eficiência e a sustentabilidade da reutilização de escórias de alto forno na indústria siderúrgica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, 2009. Propriedades físico-mecânicas de argamassas com incorporação de escória de alto-forno granulada moída. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ANDRADE, José Augusto de; CUNHA, José Maurício. A reestruturação do setor siderúrgico no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPAD, 23., 1999, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ANPAD, 1999.

ARAÚJO, L. A. Manual de Siderurgia; Produção. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. V. 1, 470p.

ARCELORMITTAL. ArcelorMittal Brasil. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/>. Acesso em: 17 abr. 2023.

ARRIVABENI, L. F. Contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para produção de concretos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2000. Disponível em: <http://servicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 21 out. 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2013). NBR 16229: Sucata de ferro fundido e aço. Rio de Janeiro, 5p.

BARBOSA, C. A. Utilização de Escória de Alto Forno em Argamassas. São Paulo, 2008.

BARROS, Gustavo. O desenvolvimento do setor siderúrgico brasileiro entre 1900 e 1940: Crescimento e substituição de importações. Estudos Econômicos (São Paulo), v. 45, p. 153-183, 2015.

BOCKEN, A. N. P. M. et al. Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of industrial and Production Engineering*, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.

BORSCHIVER, SUZANA; TAVARES, ALINE SOUZA. Rio de Janeiro, 2022. *Catalisando a Economia Circular*. Disponível em: <http://www.editora.ufrj.br/DynamicItems/livrosabertos-1/Catalisando-a-economia-circular.pdf>. Acesso em: 04 out. 2023.

BRANCO, V. T. F. C. Caracterização de Misturas Asfálticas Com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. 2004. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRAUNGART, M., MCDONOUGH, W. *Cradle-to-cradle; Remaking the way we make things*. North Point Press, 2008.

BROADBENT, C. Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. Disponível em: <https://oa.mg/work/10.1007/s11367-016-1081-1>. Acesso em: 31 ago. 2023.

BRUN, D. W.; YUAN, W. C. Caracterização e aproveitamento dos resíduos siderúrgicos principais gerados pela aciaria elétrica. Porto Alegre: PPGEMM/UFRGS, 1994, 34p. [Seminário da disciplina MTMD99- Tópicos especiais Resíduos industriais siderúrgicos: caracterização e aproveitamento].

BUHLER, Carlos. A internacionalização do setor siderúrgico brasileiro. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 11, n. 4, p. 137-156, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rac/v11n4/v11n4a06.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

CASTRO, R. A. et al. Uso de Escória de Alto Forno como Agregado em Concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2006, São Paulo, 2006.

CASTRO, MAM; COSTA, FG; BORBA, SC; NETO, EL; RABELO, AA. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos. *Revista Matéria*, 21(3), 666-676, 2016.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Gestão de coproduto: estudo prospectivo do setor siderúrgico. Nota Técnica. Brasília, 2008. 28 p. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_19_9_59_59_88597.pdf> Acesso em: 31 de ago. 2023.

COSTA, D. S.; FILHO, B. M. M.; Análise Experimental do Processo de Fabricação de Material Cerâmico Utilizando Escória de Alto-Forno e Argila. Monografia (Especialização). Belém: UFPA, 2004.

COSTA, M. E. et al. Viabilidade de uso de escória de alto forno moída como substituto parcial para cimento em concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 10., 2004, São Paulo. Anais... São Paulo, 2004.

CROSSETTI, P.; FERNANDES, A. C. O setor siderúrgico brasileiro. In: DINIZ, C. C.; BASTOS, F. A. (Org.). *Economia brasileira: uma perspectiva histórica*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. p. 429-449.

DIAS et al., 2010. A indústria siderúrgica e a questão energética. *Revista Brasileira de Energia*, vol. 16, no 1, pp. 1-35.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010. DNIT ES 141/2010: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

EBERHARDT, L. C. M.; BIRGISDOTTIR, H.; BIRKVED, M. Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings. 2019. Disponível em: <https://oa.mg/work/10.1088/1757-899x/471/9/092051>. Acesso em: 31 de ago. 2023.

Economia Circular: Oportunidades e Desafios para a indústria brasileira. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Brasília, 2018. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/2f/45/2f4521b9-d1eb-44f7-b501-cda01254738a/miolo_economia_circular_pt_web.pdf. Acesso em: 04 out. 2023.

Economia Circular: saiba o que é e por que adotar, Financeone. Disponível em: <https://financeone.com.br/economia-circular-voce-sabe-o-que-e/>. Acesso em 09/11/2023.

EHRENFIELD, J. Industrial Ecology: A New View of Life and Growth. New York: Anchor Books, 2004.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (United Kingdom). DELIVERING THE CIRCULAR ECONOMY: A TOOLKIT FOR POLICYMAKERS. 1.1 Canves: Ellen Macarthur Foundation, 2015. 177 p. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/delivering-the-circular-economy-a-toolkit-for-policymakers>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

FERREIRA, L. et al. Uso de Escória em Concretos. São Paulo, 2007.

FONSECA, Gustavo Celso da. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. Orientador: Abdias Magalhães Gomes. 2010. 105 f. Dissertação (Construção Civil)-Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

Fundação Ellen MacArthur e Fundação Getúlio Vargas (2018). Economia Circular no Brasil: Oportunidades para a Indústria. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Economia-Circular-no-Brasil_Oportunidades-para-a-Industria.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2023.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura:

conceituação, produção e publicação. *Logeion: Filosofia da Informação*, v. 6, n. 1, p. 57-73, set. 2019.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 11-32, 2016.

GIL, Antônio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 2010.

GOMES, C.O.; MONTEIRO, S.N.; SILVA, A.C.R.; CÂNDIDO, V.S. Estudo da influência do pó de balão em massas de cerâmica vermelha. 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2018.

GOMES, Delineide Pereira et al. Aproveitamento de Subprodutos Siderúrgicos na Agricultura. *Cadernos de Agroecologia*, v. 17, n. 2, 2022.

GONÇALVES, V. S.; BARROSO, F. R. A economia circular como estratégia de desenvolvimento sustentável para a indústria siderúrgica. *Revista GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias*, v. 9, n. 1, p. 2569-2583, 2019.

GONZALEZ, Tereza Sanches. *Economia circular: comparação dos avanços à transição entre Brasil e União Europeia*. 2018.

Instituto AÇO BRASIL, *Aço & Sustentabilidade* / Instituto Aço Brasil: 2022. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2022. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/Folder_AcoBrasil_SUSTENTABILIDADE_2022.pdf. Acesso em: 24 out. 2023.

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.;

SOUZA, C. M.; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F. Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, v. 143, p. 37-46, 2018.

KUMAR, S.; KUMAR, R. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 11, p. 1283-1289, 2017.

LACY, P.; RUTQVIST, J. *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*. Palgrave Macmillan, 2016.

LATIKOS, Sam. Understanding Circular Economy. *Sustainability Journal*, 2015.

LESSA, Augusto Mendonca. Avaliação de valor em uso de cargas ferríferas para alto-forno. Dissertação. Faculdades Católicas, 2018.

LIDUÁRIO, A.C. et al., 2004. Utilização de Escória de Alto Forno como Agregado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.

LIMA, W. M., 2006. Estudo Experimental da Ação de Fundentes na Reação entre a Escória de Alto-Forno e o Arame Tubular. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOBATO, N.C.C.; VILLEGAS, E.A.; MANSUR, M.B. Avaliação de alternativas tecnológicas para o gerenciamento dos resíduos sólidos siderúrgicos: escória e lamas de alto-forno. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Goiânia/GO, p. 267-274, 2013.

LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A. Coke: quality and production. 2. ed. London: Butterworths, 1989.

LORA, E. E. S. A Economia Circular e a Gestão dos Resíduos. In: Anais do 7º Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Resende: SEGET, 2000.

MACHADO, A. S. Quantificação do teor de char e finos de coque no pó de balão do altoforno por difração de raios-x. 2011. 139 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2011.

MARTINEZ, L.; BLANCO, A. Social implications of using steel slag in road construction. *Journal of Cleaner Production*, v. 220, p. 792-800, 2019.

McLEAN A. Blast Furnace Reactions, An Intensive Course, Blast Furnace Ironmaking. Ontario: McMaster University, 2002. 31p. Lecture 2.

MEDEIROS, K. P. M. de et al. Estudo do uso da escória siderúrgica de alto forno e estéril de mineração como alternativa de revestimento primário em estradas não pavimentadas. 2019.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Escola Politécnica USP. 1994.

MELLO, L. C. B. B. Advantages and disadvantages of the Brazilian steel industry. *Journal of Materials Research and Technology*, v.5, n.1, p. 77-83, 2016.

MOTHÉ, C. G.,. Proposta de uma Rotina de Cálculo de Equilíbrio Térmico de um Alto-Forno à Coqueria. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2008.

MOURA, W.A. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. 2000. 37 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

MOURÃO, M. B. et al. Introdução à siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

MOURÃO, MB; YOKOJI, A; MALYNOWSKYJ, A; LEANDRO, CAS; TAKANO, C; QUITES, EEC; GENTILE, EF; SILVA, GFBL; BOLOTA, JR; GONCALVES, M; FACO, RJ. Introdução à siderurgia, 1 ed., São Paulo, ABM, 2011.

NEHRING, Victor et al. Utilização da escória de alto forno em materiais cimentícios. A Construção Civil em uma perspectiva econômica, ambiental e social, v. 21, p. 323-330, 2021.

NEIVILLE, A.M. Propriedades do concreto. 2ª ed. São Paulo. PINI, 1997.

PASSETO, M.; BALDO, N. 2010. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. Journal of Hazardous Materials, Volume 181, Issues 1–3, 15 September 2010, Pages 938-948.

PEACEY J. G.; DAVENPORT W. G. The Iron Blast Furnace; Theory and Practice. 1.ed. London: Pergamon Press, 1979. 251p. Vol. 31.

RIBEIRO, C. C, Pinto S. D. J, Starling T. Avaliação da resistência e da durabilidade do concreto composto com escória de alto forno brita zero e aditivos plastificantes. Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC, Florianópolis, Santa Catarina, julho 2006.

RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos siderúrgicos: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo: Campo Belo, 2005.

SCANDIUZZI, L; BATTAGIN, A. F. A utilização da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1990. (Boletim nº 35).

SCHMIDT, N. Raw materials and their importance for various types of goods production. International Journal of Economics, Commerce and Management, v.9, n.5, p. 21-35, 2021.

SERVIÇO DE ESTUDOS DO PARLAMENTO EUROPEU, Economia Circular: Definição, importância e benefícios. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>. Acesso em: 24 out, 2023.

SILVA, A. C. F., 2016. Aproveitamento de resíduos siderúrgicos na indústria do cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, A. Possibilidade de substituição parcial de cimentos tradicionais com escória de alto forno em argamassas adesivas. Goiânia, 2009.

SILVA, M.R.,. Estudo da escória de alto forno como adição-ativo para argamassa. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2006.

SIQUEIRA, E. R. L. (2015). SIMULAÇÃO DE GÁS NATURAL INJETADO PELAS VENTANEIRAS DO ALTO FORNO. Dissertação. Faculdades Católicas.

SMITH, J.; BROWN, T.; EVANS, E. Reuse of iron and steel slag in the construction industry. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 1, n. 1, p. 27-37, 2015.

SOETE, L.; FREEMAN, C. *The Economics of Industrial Innovation*. 3rd ed. London: Pinter, 2012.

SOUZA, R. *Escassez de Escória Pelotizada no Brasil*. Rio de Janeiro, 2006.

SPIILKI, F. R., & ARAÚJO, D. F. O desafio da transição para a economia circular no Brasil. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, 2019. Disponível em: <<https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/rbgdr/article/view/1823/1613>>. Acesso em: 22 de mar.2023.

STAHEL, W. R. The circular economy. *Nature*, v. 531, p. 435-438, 2016.

STOCK, T. et al. *Industry 4.0: Implementation Practice of Manufacturing*.

STUBBLES, J. Eficácia energética em fornos elétricos a arco: uma perspectiva do século XXI. *Jornal da Siderurgia e Metalurgia*, v. 15, n. 8, p. 123-130, 2009.

Trinkel, V.; Mallow, O.; Aschenbrenner, P.; Rechberger, H.; Fellner, J. Characterization of blast furnace sludge with respect to heavy metal distribution. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 55, p. 5590-5597, 2016.

VALKOKARI, K. et al. Circular Economy Business Model Innovation Process - Case Studies from the Finnish Manufacturing Industry. *Journal of Manufacturing Systems*, v.47, p. 53-66, 2018.

VAN BELLEN, H. M. *Indicadores de Sustentabilidade: uma análise comparativa*.

2002. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

Vieira, C. M. F.; Dias, C. A. C. M; Vasconcelos, A. M.; Sánchez, R. J.; Monteiro, S. N. Incorporação de lama de alto-forno em cerâmica vermelha. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2007, Salvador. Anais do 51 Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo: Tecart, v. 1. p. 1-12, 2007.

VIKA, Siderurgia ao longo da nossa história. (2023). Disponível em: <https://www.vikacontrols.com.br/medicao-controle-siderurgia>. Acesso em: 22 set. 2023.

WEBSTER, K. The Circular Economy: A Wealth of Flows. 2nd ed. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Disponível em: http://www.worldsteel.org/pictures/programfiles/Fact%20sheet_By-products.pdf. Acesso em: 04 out. 2023.

WORRELL, E.; BERNSTEIN, L.; ROY, J.; PRICE, L.; HARNISCH, J. Industrial energy efficiency and climate change mitigation. Energy Efficiency, v. 2, p. 109-123, 2010.