



LUCAS BARROS PATRÍCIO

**ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL
DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA NO
CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR**

**LAVRAS - MG
2023**

LUCAS BARROS PATRÍCIO

**ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL
DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA NO
CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Química,
para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Gilson Campani Junior
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

LUCAS BARROS PATRÍCIO

**ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL
DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA NO
CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR**

**ALTERNATIVES FOR THE SUSTAINABLE USE OF BY-
PRODUCTS OF THE STEEL INDUSTRY IN THE CONTEXT
OF THE CIRCULAR ECONOMY**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Química,
para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Gilson Campani Junior – UFLA
Prof. Dr. Cristiane Alves Pereira – UFLA
Prof. Dr. Natália Maira Braga Oliveira – UFLA

Prof. Dr. Gilson Campani Junior
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Chego ao fim de mais uma etapa da minha vida, esse é o último passo para a conclusão da graduação, e hoje só tenho a agradecer todos aqueles que estiveram presente e me ajudaram durante toda esta trajetória.

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e por sempre me dar forças para conseguir alcançar meus objetivos.

Aos meus pais e avós, por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade, por todo amor, incentivo e apoio.

Aos meus amigos pelo companheirismo e compreensão e a minha namorada por ter me amparado em momentos difíceis.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras pelos ensinamentos e por ter me proporcionado a chance de expandir os meus horizontes. E, por fim, ao professor Dr. Gilson Campani Junior pela orientação, grande disposição e dedicação em me ajudar no desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

A siderurgia é um dos ramos industriais essenciais para o Brasil e para o mundo, na medida em que é o alicerce de várias cadeias produtivas, tais como a automotiva, a da construção civil, a de bens de capital, dentre outras. Em contrapartida, a indústria siderúrgica produz uma quantidade elevada de resíduos e subprodutos durante os seus processos produtivos. Segundo o Instituto Aço Brasil, no ano de 2020 a geração de resíduos e subprodutos foi de 622 kg para cada tonelada de aço produzido. Diante deste número e considerando a crescente demanda gerada pelo aumento populacional, bem como a provável escassez de recursos não renováveis daqui alguns anos, faz-se necessária a troca do sistema econômico linear e a priorização pela economia circular, de caráter restaurativo, que defende a reinserção de resíduos como insumo em outras matrizes produtivas. Desse modo, a demanda por recursos minerais, energéticos e hídricos é minimizada, bem como a disposição final inadequada dos resíduos e emissões atmosféricas. O presente trabalho tem como intuito apresentar e discutir as principais alternativas de aplicações dos subprodutos gerados pela indústria siderúrgica. Dentre elas, são discutidos, por exemplo, o uso já consolidado da escória para fabricação de cimentos e em obras rodoviárias e ferroviárias, a utilização de moinha de biorredutor no processo de injeção de carvão pulverizado e a utilização de finos de minério na produção de sinter e pelotas. Porém, ainda existem muitas oportunidades para o desenvolvimento de novas destinações dos subprodutos gerados. Para que isto ocorra, é necessário que as matrizes industriais favoreçam o intercâmbio de conhecimento e soluções para o reaproveitamento de subprodutos, uma vez que o resíduo de uma indústria pode se tornar uma fonte de matéria-prima para outra. Além disso, o aproveitamento de resíduos sólidos gerados cumpre com a sustentabilidade socioambiental e torna o processo produtivo mais eficiente economicamente.

Palavras-chave: Aço, siderurgia, sustentabilidade, meio ambiente.

ABSTRACT

The steel industry is one of the essential industrial branches for Brazil and the world, as it is the foundation of several productive chains, such as the automotive, civil construction, capital goods, among others. On the other hand, the steel industry produces a high amount of waste and co-products during its production processes. According to Instituto Aço Brasil, in 2020 the generation of waste and co-products was 622 kg for each ton of steel produced. In view of this number, in addition to the increase in demands generated by population growth and the scarcity of resources, it is necessary to change the linear economic system as well as the probable scarcity of non-renewable resources in a few years, with a restorative character, which advocates the reinsertion of waste as an input in other productive matrices. In this way, the demand for mineral, energy and water resources is minimized, as well as the final disposal of waste and atmospheric emissions. The purpose of this work is to present and discuss the main strategies for application of co-products generated by the steel industry. Among them, the main destinations discussed are the already consolidated use of slag for the manufacture of cement and in road and railway works, the use of bio-reducer dust in the process of injecting pulverized coal, and the use of ore fines in the production of sinter and pellets will be discussed. However, there are still many opportunities for the development of new destinations for the co-products generated. Hence, it is necessary that the industrial matrices favor the exchange of knowledge and solutions for the reuse of co-products, since an industry residue may be the source of raw material to another. Moreover, the use of solid waste generated satisfies socio-environmental sustainability and economically improves the production process.

Keywords: Steel, steel industry, sustainability, environment

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	CENÁRIO SIDERÚRGICO MUNDIAL	11
3	CENÁRIO SIDERÚRGICO BRASILEIRO.....	13
4	FABRICAÇÃO DO AÇO	15
4.1	Matérias-primas.....	15
4.1.1	Minério de ferro	15
4.1.2	Agente redutor.....	16
4.1.3	Fundentes	17
4.2	Redução.....	18
4.3	Refino	21
4.3.1	Convertedor LD.....	21
4.3.2	Forno elétrico a arco.....	23
4.4	Lingotamento e laminação	24
5	ECONOMIA CIRCULAR	24
6	SUBPRODUTOS SIDERÚRGICOS.....	25
6.1	Escórias	26
6.1.1	Usos de escória de altos-fornos	26
6.1.1.1	Fabricação de cimento Portland	27
6.1.1.2	Produção de concretos como adição mineral	28
6.1.2	Usos de escória de aciaria	28
6.1.2.1	Obras rodoviárias e ferroviárias	28
6.1.2.2	Fabricação de vitrocerâmicos.....	29
6.1.2.3	Recifes artificiais tetrápodes	29
6.1.2.4	Barreiras para dissipação de ondas naturais	30
6.1.2.4	Fertilizante na agricultura.....	31
6.2	Finos de minério.....	32
6.3	Moinha de biorredutor.....	33
6.4	Pó de balão	34
6.5	Lama de alto-forno	35
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37

REFERÊNCIAS	38
-------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O primeiro contato do homem com o elemento ferro foi sob a forma de meteoritos, sendo que os dois artefatos de ferro mais antigos de que se têm notícia foram encontrados no Egito e são datados de 2600 e 2900 a.C. (RANGEL, 2012).

O registro mais antigo de um processo de redução de minério de ferro foi encontrado nas paredes de uma tumba egípcia, datada de aproximadamente 1500 a.C. (RANGEL, 2012). Porém, a exploração e o consumo de minério de ferro se tornaram mais significantes a partir do século XVIII com a revolução industrial, que é compreendida como um período de constantes avanços tecnológicos, desenvolvimento de sistema de produção altamente mecanizado e intensa urbanização das cidades.

Nesse contexto, as melhorias no processo siderúrgico fizeram com que o setor desenvolvesse grande relevância no mercado mundial e nacional. No ano de 2021, o setor siderúrgico brasileiro apresentava um parque produtivo constituído por 31 usinas, sendo 15 integradas, que consistem na transformação do minério de ferro em aço e deste em produtos finais, e 16 semi-integradas, que iniciam seu processo na aciaria, com 120 mil colaboradores e uma capacidade produtiva instalada de 51 milhões de toneladas/ano. Dentre os maiores produtores de aço bruto no mundo, o Brasil ocupava a nona posição, obtendo um faturamento líquido de R\$108 bilhões, totalizando investimentos na ordem de R\$158,7 bilhões entre os anos de 2008 e 2021 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022C).

Apesar do grande desenvolvimento apresentado pelo setor, outro ponto que deve ser observado é o aumento constante da necessidade de recursos não renováveis, que está atrelado ao modelo econômico atual que segue o paradigma linear de extrair, produzir, utilizar e descartar.

A economia circular é uma alternativa ao sistema de produção linear, pois visa o fechamento dos ciclos de produção e consumo no sistema industrial. Regenerativo e restaurativo por princípio, o termo surge em 1990, na Inglaterra, e trata-se de um modelo econômico capaz de unir a sustentabilidade ambiental e econômica das indústrias por meio de processos produtivos eficientes e estratégicos. Esse novo conceito visa mudar a noção de resíduos, estender a vida útil dos produtos, mantendo-os em utilização pelo maior tempo possível e, assim, trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais à sociedade (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022).

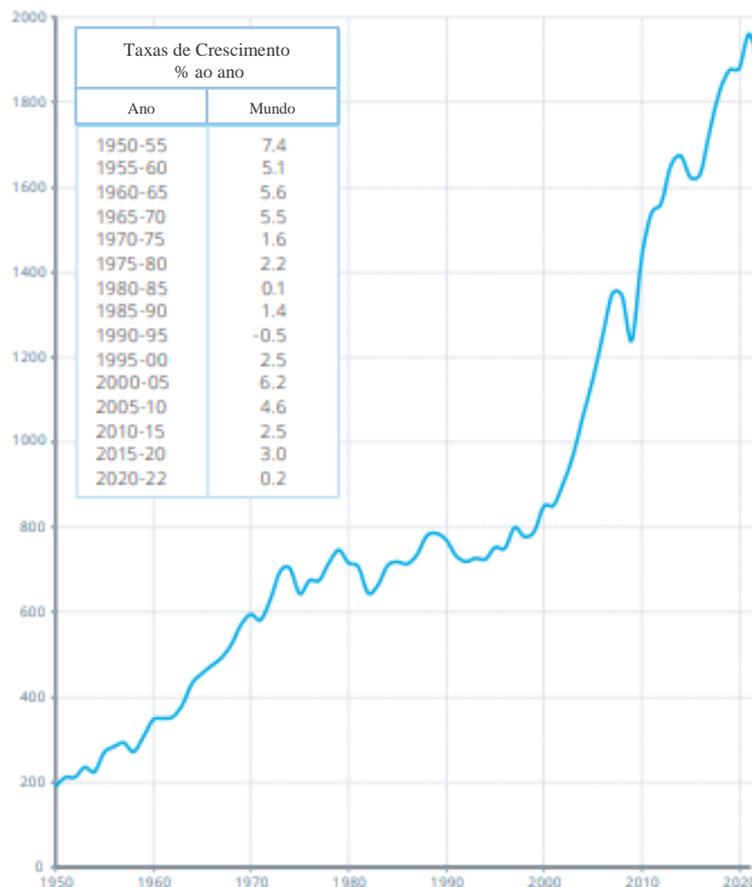
Tendo em vista que o minério de ferro, o carvão e o calcário, são recursos esgotáveis, constituem algumas das principais matérias-primas para a produção do aço, e que o setor siderúrgico nacional gera cerca de 19 milhões de toneladas de subprodutos e resíduos, este

trabalho de conclusão de curso pretende analisar a indústria siderúrgica sob um olhar direcionado aos resíduos gerados no processo produtivo e possíveis aplicações sustentáveis. Com isso, se busca elucidar e evidenciar como a implementação da economia circular em processos industriais siderúrgicos é capaz de reduzir impactos ambientais. A utilização de subprodutos em outras cadeias produtivas pode reduzir a destinação inadequada dos mesmos e ainda diminuir, ou até mesmo evitar, o consumo de recursos não renováveis nestes processos. A economia circular pode ainda ser sustentável além de ambientalmente, como também economicamente, agregando lucro financeiro às operações industriais.

2 CENÁRIO SIDERÚRGICO MUNDIAL

A produção mundial de aço bruto apresentou seu sexto ano consecutivo de crescimento, obtendo uma produção total de 1,962 bilhões de toneladas em 2021. Essa representa uma taxa média de crescimento de 3,8% ao ano, o que lhe proporciona alcançar o maior volume já produzido historicamente, como pode ser observado pela Figura 1. Porém, em 2022, a produção global de aço bruto caiu aproximadamente 4% alcançando a marca de 1,885 bilhões de toneladas de aços brutos produzidos (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2023).

Figura 1 - Evolução da produção global do aço bruto (em milhares de toneladas)

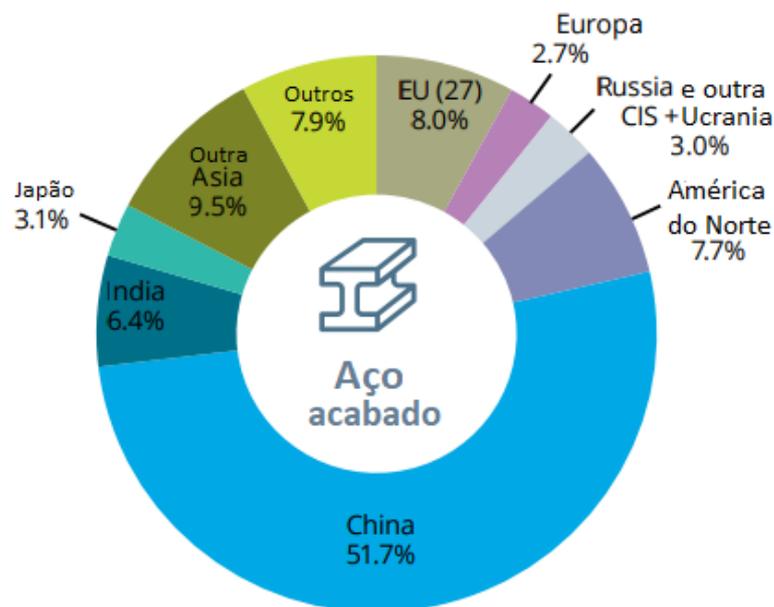


Fonte: Adaptado de Worldsteel Association (2023)

Neste cenário, a China lidera com uma produção total de 1.018 milhões de toneladas, o que representa 54% da produção mundial. Em sequência estão a Índia e o Japão com produções menos significativas de 125,3 e 89,2 milhões de toneladas, respectivamente (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2023).

De toda esta produção, a Ásia é responsável pelo consumo aparente, que considera a soma das produções locais e importações menos as exportações, de 70,7% dos produtos siderúrgicos acabados, impulsionada principalmente pela China, que sozinha representa 51,7% de todo consumo aparente do planeta. Sendo assim, a China é primeira colocada entre os países neste quesito, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Uso aparente de aço (produtos de aço acabados)



Fonte: Adaptado de Worldsteel Association (2023)

Com relação à exportação mundial de aço, em 2022 a China também ocupou a primeira colocação com 68,1 milhões de toneladas, seguido pelo Japão e União Europeia com 31,7 e 26 milhões de toneladas, respectivamente. Por outro lado, os maiores importadores são a União Europeia, com 48,1 milhões de toneladas, seguida pelos Estados Unidos, com 28,9 milhões de toneladas (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2023).

Em 2022 o comércio de aço foi afetado pela tragédia humana e econômica que está ocorrendo na Ucrânia, sendo que a magnitude do impacto deste conflito é variável entre as regiões dependendo de seu comércio direto e exposição financeira à Rússia e à Ucrânia, mas apesar disto, prevê-se que a demanda por aço crescerá 2,3% em 2023, atingindo 1.822,3 milhões de toneladas e que em 2024, a demanda por aço terá um crescimento de 1,7%, atingindo 1.854,0 milhões de toneladas (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2023).

3 CENÁRIO SIDERÚRGICO BRASILEIRO

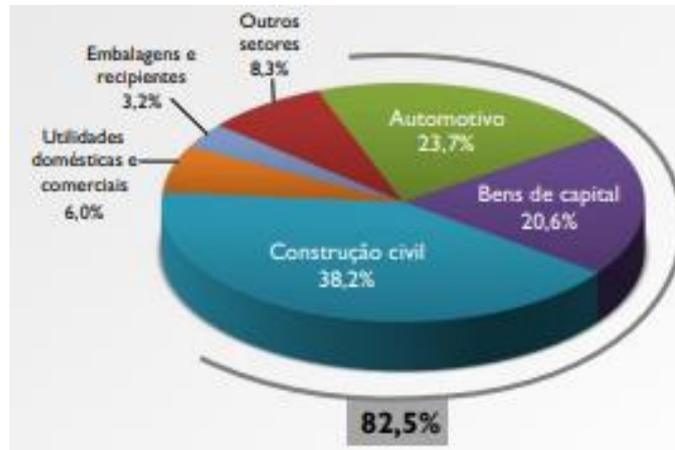
A indústria do aço brasileira está distribuída em 11 estados, com grande concentração na região sudeste, principalmente no estado de Minas Gerais que apresenta o maior número de usinas instaladas.

Apesar de estar utilizando apenas 71% de sua capacidade produtiva instalada, a produção brasileira de aço bruto cresceu 14,8% em 2021, alcançando a marca de 36,1 milhões de toneladas. Porém, em 2022, a produção de aço bruto brasileira caiu, aproximadamente, 5,5% alcançando a marca de 34,1 milhões de toneladas. Dentre os principais produtos produzidos estão: (i) os aços planos, que são produtos com a largura muito superior à sua espessura e são encontrados na forma de chapas e bobinas, correspondendo a 15,4 milhões de toneladas; (ii) os aços longos, que são resultantes da laminação e possuem o comprimento muito superior a maior dimensão da seção transversal, constituindo-se de vergalhões, fio-máquina, barras tubos e perfis correspondendo a 10,6 milhões de toneladas; (iii) e os aços semiacabados, que são oriundos do lingotamento contínuo e são destinados em sua maioria à exportação, correspondendo a 8,7 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022A).

Neste mesmo ano, na comparação internacional, a indústria nacional do aço foi responsável por 1,8% da produção mundial, mantendo-se na 9ª colocação na classificação global de produtores de aço. Já na América Latina, o Brasil se manteve na 1ª posição, com 54,9% da produção de aço da região (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2023).

Devido à recuperação dos setores consumidores mais afetados pela pandemia SARS-COV-19 em 2020 e à recomposição de estoques desses setores, as vendas internas de produtos siderúrgicos cresceram 14,6% em 2021, para 22,3 milhões de toneladas. Os principais setores consumidores foram o da construção civil, automotivo e bens de capital, que somados corresponderam a 82,5% do consumo brasileiro, como pode ser observado na Figura 3 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022D).

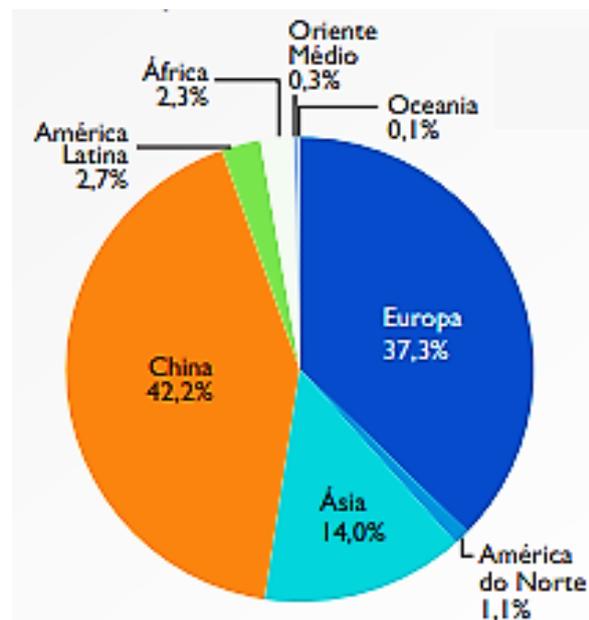
Figura 3 – Participação no consumo de produtos siderúrgicos dos principais setores consumidores



Fonte: Instituto Aço Brasil (2022A)

Mesmo com o crescimento das vendas domésticas, as exportações cresceram 4,1%, totalizando 11,0 milhões de toneladas, sendo os principais destinos dos produtos brasileiros a América do Norte, América Latina e a Europa, correspondendo a 52,8%, 31,1% e 12,1% das exportações, respectivamente. As importações também registraram aumento em 2021 de 144,2%, para 5,0 milhões de toneladas, sendo a China responsável por fornecer 42,2% dos produtos importados, como pode ser observado na Figura 4 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022C).

Figura 4 – Origem das importações de aço



Fonte: Instituto Aço Brasil (2022A)

O crescimento das vendas internas e das importações impulsionou a variação do consumo aparente de produtos siderúrgicos gerando um aumento de 22,8% em 2021, em 26,3 milhões de toneladas, o maior patamar desde 2013 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022D).

4 FABRICAÇÃO DO AÇO

4.1 Matérias-primas

Os principais insumos necessários para a produção do aço são o minério de ferro sob a forma granulada, sinter ou pelota, o agente redutor, que pode ser tanto o coque quanto o carvão vegetal, e os fundentes (quartzo, calcário, dolomita etc.).

4.1.1 Minério de ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante encontrado na superfície terrestre, sendo encontrado na proporção de 5,01%. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em 2017, as reservas mundiais de minério de ferro detêm como estimativa por volta de 170 bilhões de toneladas, sendo cerca de 52 bilhões localizadas na Austrália, 25 bilhões na Rússia, 23 bilhões no Brasil e 21 bilhões na China (IBRAM,2018). Apesar de uma grande quantidade de minerais apresentarem ferro em suas composições, somente as espécies óxidos apresentam grandes concentrações deste elemento e, por isto, são os mais importantes para a siderurgia. Os principais minerais que contêm ferro são a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e siderita (FeCO_3) (PEREIRA, 2012). No Brasil, as jazidas de minério de ferro ficam a céu aberto e seu desmonte ocorre por meio de explosivos. Posteriormente, o material obtido é transportado por escavadeiras e direcionado para um processo de britagem, peneiramento, lavagem, classificação, concentração e pelotização. O minério bruto após o beneficiamento gera produtos classificados como granulados (acima de 6,3 mm), *sinterfeed* (entre 0,15 e 6,3 mm) e *pelletfeed* (abaixo de 0,15 mm). Os granulados são direcionados diretamente para a indústria siderúrgica, enquanto que os finos passam por processos de aglomeração (sinterização e pelotização), para posteriormente serem direcionados à indústria.

Cerca de 99% do minério de ferro produzido são utilizados na fabricação de aço e ferro fundido (PEREIRA,2012).

Nas siderúrgicas, antes de ser enforado, o minério de ferro é submetido a análises químicas a fim de garantir que as matérias-primas apresentam elevado teor de Fe, acima de 55%,

e baixo teor de impurezas. Posteriormente, passam por processos de classificação, secagem, peneiramento e pesagem.

O processo de secagem implica no aumento da eficiência de peneiramento, permitindo que os finos se soltem da superfície das partículas do minério, gerando assim um dos primeiros subprodutos do processo de produção de aço, os finos de minério. O peneiramento tem por objetivo manter o minério dentro da faixa granulométrica desejada, que deve ter granulometria de 8 a 25 mm (SANTOS, 2007). O menor tamanho do minério melhora sua redutibilidade, porém, quando uma grande quantidade de finos é carregada no alto-forno, a permeabilidade torna-se baixa, prejudicando o processo. Portanto, o minério deve ter um tamanho máximo em termos de redutibilidade, e um tamanho mínimo em termos de permeabilidade.

Os altos-fornos a coque, por apresentarem maior volume, são mais exigentes em relação à qualidade da carga metálica. É indispensável, para o bom andamento do processo, que um alto-forno a coque de grande porte utilize uma carga metálica preparada (sínter e/ou pelota).

Já os altos-fornos a carvão vegetal trabalham com boa eficiência, mesmo utilizando somente minério de ferro granulado. A utilização das pelotas ou do sínter visa melhorar a permeabilidade da carga do alto-forno, reduzir o consumo de carvão e acelerar o processo de redução.

4.1.2 Agente redutor

O coque ou carvão vegetal apresentam as mesmas finalidades no processo siderúrgico, que é fornecer calor para a combustão, sustentar a carga no interior do alto-forno, fornecer carbono para a redução do minério de ferro e, conseqüentemente, fornecer carbono para o ferro-gusa, sendo o elemento carbono o segundo maior constituinte do ferro-gusa.

A deposição de matéria orgânica vegetal em bacias sedimentares, que sofrem ação de pressão e temperatura em ambientes sem contato com o ar em decorrência de soterramento, bem como a atividade orogênica, passam por um processo denominado carbonificação. A partir desse fenômeno, o material acaba se solidificando, enriquecendo de carbono e perdendo oxigênio e hidrogênio, o que dá origem ao carvão mineral, que é a matéria-prima para a geração do coque.

O processo de coqueificação é a transformação do carvão mineral em coque nos fornos de coqueria. Nesses fornos, o carvão é submetido a temperaturas elevadas na ausência de oxigênio, o que implicará na liberação de gases do carvão, tendo como produto final um resíduo sólido poroso, o coque, que apresenta teor de carbono fixo em torno de 88% (RIBEIRO, 2011).

Já o carvão vegetal, originado de árvores cultivadas, é uma alternativa ao carvão de origem fóssil e apresenta teor de carbono entre 56% e 75%. Atualmente, as espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas no Brasil para a produção de carvão vegetal. As principais espécies de *Eucalyptus* utilizadas no Brasil para a plantação de florestas energéticas são *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligma*, *Eucalyptus camadulensis*, *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* (SANTOS, 2010).

A transformação da madeira em carvão é feita em fornos de tipos variados. Algumas fornalhas empregadas pelas grandes empresas são mecanizadas, mas o modelo mais frequente e simples é a construção com tijolos de barro, na forma de iglu representando pelo menos 95% dos fornos em atividades, estes fornos do tipo “rabo quente” apresentam baixo custo de instalação, podem ser construídos com barro, enterrados em encostas ou feitos de alvenaria (BRITO et al., 2006).

A opção pelo carvão vegetal ou coque como combustível em alto-forno não modifica os fundamentos do processo de produção do ferro-gusa. Entretanto, utilizando-se carvão vegetal tem-se uma operação mais complexa e sujeita a maiores transtornos, devido à variação de suas propriedades, em função do tipo de madeira, da idade e das variáveis do processo de carbonização. Já o coque permite obter uma maior estabilidade de suas características (RIBEIRO, 2011).

Além disto, as diferenças entre as propriedades destas duas matérias-primas também influenciam nas dimensões dos reatores. Altos-fornos de grande porte utilizam-se de coque como redutor, pois o uso de carvão vegetal limita o tamanho do forno porque este material não suporta altas cargas, sendo utilizado em altos-fornos que produzem no máximo valores próximos de 1200 toneladas de ferro-gusa por dia (RIBEIRO, 2011).

4.1.3 Fundentes

Os fluxantes, também denominados de escorificantes ou fundentes, são os materiais adicionados à carga metálica enforada nos altos-fornos, para que possam reagir com os constituintes indesejáveis desta carga e propiciar a formação das escórias durante o processo de redução. As impurezas indesejáveis são o fósforo, o enxofre, os álcalis (Na, K) e metais voláteis (Zn, Cd) e, em alguns casos, cloretos (MOURÃO et al, 2007).

Os fundentes têm a função de controlar a composição do ferro gusa e a basicidade/acidez e potencial de oxidação das escórias, melhorando a fluidez destas. Além disto, os fundentes também se dissolvem na ganga/escória e formam uma solução com menor temperatura,

permitindo assim que o processo seja viabilizado a baixas temperaturas, a partir de 1200 °C. Normalmente, os fundentes são óxidos ou carbonatos e fluoretos.

Os óxidos e carbonatos são os mais utilizados por afetarem menos o meio ambiente. Exemplos destes materiais são os óxidos de cálcio, magnésio, silício, bário etc., ou os correspondentes carbonatos contendo estes componentes, tais como o calcário, dolomita e magnesita. Os carbonatos durante o processamento são decompostos em óxidos correspondentes e dióxido de carbono por uma reação bastante endotérmica (MOURÃO,2007).

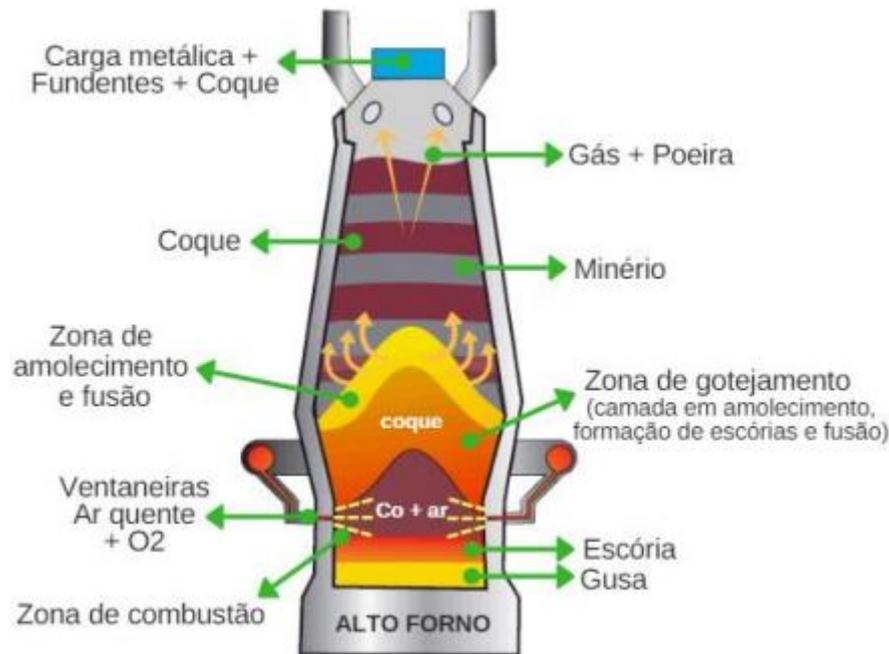
O fluoreto de cálcio (fluorita) é um eficiente fundente, melhorando a fluidez das escórias siderúrgicas. Porém, a sua característica de dissolver óxidos também afeta negativamente o processo pelo desgaste mais intenso dos refratários (MOURÃO,2007).

4.2 REDUÇÃO

As cargas de minério de ferro e carvão ou coque, após passarem pelas peneiras e gerarem finos de minério e finos de carvão (moinha) ou finos de coque, são enviados via correias transportadoras ou *skips* para o topo do alto-forno onde se juntam aos fundentes. Este processo de carregamento ocorre de maneira alternada, sendo a carga metálica mais os fundentes separados da carga de carvão ou coque. O sistema de carregamento é importante na distribuição da carga, pois a disposição deste material no interior do alto-forno exerce influência na operação, uma vez que ela constitui um dos fatores determinantes da eficiência das trocas térmicas e das reações de redução, além de afetar diretamente no formato e na posição da carga térmica sobre a parede do forno.

O alto-forno se trata de um reator que funciona em contracorrente, no qual as matérias-primas são depositadas e consumidas de forma descendente e os gases redutores ascendem e percolam a carga. Além disto, o alto-forno pode ser dividido em zona de pré-aquecimento, zona de redução (ou de reserva térmica) e zona de elaboração, de acordo com o seu perfil térmico, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Funcionamento de um alto-forno para produção de ferro gusa a partir de minério de ferro



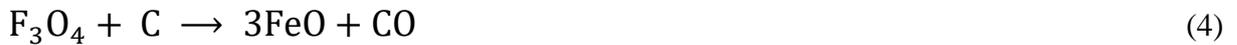
Fonte: Saturnino (2019)

O processo de redução se inicia quando o oxigênio aquecido, originado da captação e passagem deste pelos regeneradores de calor dotados de serpentinas, é injetado pelas ventaneiras do reator. O oxigênio reage então com o carvão pulverizado/coque em temperaturas de aproximadamente 1500 °C, como observado na Equação 1. A medida que o oxigênio reage com o carbono incandescente do carvão pulverizado/coque, em uma altura de 1 m da ventaneira, já não se tem oxigênio disponível. Logo, o dióxido de carbono reage com o carbono incandescente ainda presente no meio, o que gera o monóxido de carbono, conforme a Reação de Boudouard expressa pela Equação 2.



Verifica-se que o carvão ou coque possui múltipla função na fabricação do aço. Atua como combustível, visto que através de sua combustão propicia a energia suficiente para que ocorra a fusão do minério, e também como redutor, pois associa-se ao oxigênio e forma o CO, que ascende em contracorrente à descida da carga metálica. A medida que esse gás redutor entra

em contato com a carga, o minério de ferro sofre o processo de redução, no qual o ferro se desprende do oxigênio, conforme as Equações 3, 4 e 5 (SILVA, 2011).



Como dito anteriormente, o oxigênio que estava associado ao ferro presente no minério se une ao carbono presente no carvão ou coque, formando os óxidos de carbono, que por sua vez constitui parte do gás dos altos-fornos (GAF). Este é então retirado do processo e direcionado ao sistema de lavagem de gás juntamente com os particulados arrastados pelo GAF.

A partir de 1200 °C os fundentes, principalmente os óxidos de manganês (MnO), de silício (SiO₂), fósforo (P₂O₅), cálcio (CaO), alumínio (Al₂O₃) e magnésio (MgO), unem-se à ganga (impurezas) do minério e às cinzas do agente redutor para formar a escória. A partir de 1350 °C inicia-se o processo de fusão dos componentes da carga, com exceção do carvão vegetal. A 1500 °C estabelece-se a zona de combustão com a formação do hidrogênio e do óxido de carbono, como resultado da combinação entre o oxigênio, o vapor de água do ar e o carbono do agente redutor (ALMEIDA, 2014).

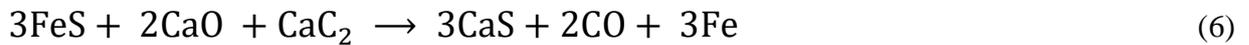
Para que todo este processo ocorra e que todas estas reações sejam realizadas, é necessário um tempo médio entre 4 e 8 horas, variando de acordo com as dimensões do alto-forno. Esse é o tempo necessário para que a matéria-prima percorra todo o comprimento do alto-forno até alcançar o fundo do forno, denominado cadinho, na forma de ferro fundido, denominado gusa, e escória líquida que se trata de uma mistura de óxidos não reduzidos. Estes produtos líquidos são vazados em intervalos regulares de tempo.

Devido à diferença de massa específica entre estes dois materiais, o gusa com cerca de 7 kg/m³ e a escória com aproximadamente 3 kg/m³, é possível separar-los por meio da gravidade, formando-se duas camadas, a inferior (metálica) e a superior (escória), facilitando o vazamento de ambos os produtos.

O ferro gusa resultante deste processo contém teores de carbono, em torno de 3,5% e 4,5%, e outras impurezas como silício, enxofre e fósforo. Porém, a porcentagem de carbono ideal no aço está na faixa de 0,008% a 2,0% dependendo do tipo de aço a ser produzido. Na maioria dos casos, o teor é menor que 1% e, devido a isto, o ferro gusa é direcionado à etapa de

refino, na aciaria, a fim de se atingir o teor de carbono desejado e a diminuição do teor de impurezas (LOPES,2018).

Vale ressaltar também que o ferro gusa proveniente de altos-fornos a base de coque apresenta concentrações de enxofre em torno de 0,03%, que é um dos contaminantes mais problemáticos presentes no gusa líquido. Para tipos superiores de aços, é usado um nível máximo de enxofre de 0,008% (GEERDES; TOXOPEUS; VLIET, 2009). Geralmente, opta-se em realizar o processo de dessulfuração ainda no carro torpedo, um vagão especial revestido de material refratário que realiza o transporte do gusa, antes de chegar à aciaria, em função de menores custos financeiros. Desse modo, tem-se a injeção de CaC_2 no gusa líquido e a consequente liberação do ferro, como pode ser observado na Equação 6.



4.3 REFINO

O gusa produzido no alto forno é transportado até a aciaria para que ocorra o refino e a transformação do ferro gusa em aço. O processo de refino baseia-se em reações de oxidação das impurezas presentes no gusa em conjunto com a adição de ingredientes imiscíveis ao metal líquido, para que neles se fixem as impurezas, removendo-as do metal na forma de escória que, novamente, por diferença de densidade, se separa do metal. Além disto, parte das impurezas é retirada do metal pelos gases formados nas reações de refino.

O processo de refino pode ocorrer via convertedor LD (Linz-Donawitz) ou Forno Elétrico a Arco, sendo o convertedor LD a rota mais adotada, correspondendo a mais de 70% da produção mundial de aço (LOPES, 2018).

4.3.1 Convertedor LD

O convertedor consiste em um reator metalúrgico no qual se tem a injeção de oxigênio de altíssima pureza, maior que 99%. O processo LD até 2005 foi responsável por cerca de 77% da produção brasileira de aço (MOURÃO et al, 2007). Este processo apresenta como característica alta produtividade e grande flexibilidade metalúrgica, sendo viável economicamente para a fabricação da maioria dos tipos de aços.

As principais matérias-primas utilizadas no processo são o gusa líquido, gusa sólido, sucata de aço e/ou ferro, oxigênio, fundentes.

Para o carregamento da carga sólida (sucata de aço e/ou ferro ou gusa sólido), o reator é basculhado para uma posição inclinada, cerca de 60°. Posterior ao assentamento da carga, o convertedor é carregado com o gusa líquido, que constitui a parte predominante da carga metálica, variando entre 70% e 80% da carga, sendo seu aporte térmico responsável pela quase totalidade do fornecimento de calor ao processo (MOURÃO et al, 2007).

A lança de oxigênio suspensa é introduzida na mistura, alcançando maiores profundidades e promovendo uma agitação homogênea e, conseqüentemente, a oxidação das impurezas. Simultaneamente ao sopro de oxigênio, são adicionados a cal (CaO), a cal dolomítica (CaCO₃.MgCO₃) e outros fundentes como a fluorita (CaF₂), que podem ser totalmente adicionados no início do sopro, ou parceladamente durante o processo. O principal papel dos fundentes é reduzir o ponto de fusão da escória e favorecer a formação. Além disso, a cal é responsável por neutralizar os óxidos ácidos resultantes da oxidação, para que eles não ataquem o revestimento básico do conversor. A cal dolomítica tem a função de saturar a escória em óxido de magnésio (MgO), diminuindo sua acidez, a fim de evitar também o ataque, pela escória, do revestimento refratário. A fluorita, por sua vez, torna a escória mais fluida e, portanto, mais reativa, favorecendo assim, as reações de desfosforação (SILVA, 2011).

Dentro do convertedor, ocorrem as reações de dessiliacção, descarburacção, desfosforacção, oxidacção do manganês e oxidacção do ferro. Praticamente, todas as reações que ocorrem no processo LD são exotérmicas, isto é, liberam calor, principalmente as reações de oxidacção do silício (dessiliacção), Equacção 7, e do manganês, Equacções 8 e 9. Desta forma, há uma elevacção acentuada da temperatura. Devido a isto, a reacção de desfosforacção, Equacções 10, 11 e 12, ocorre primeiro, pois são necessários baixas temperaturas e elevado teor de FeO na escória para que a reacção de oxidacção do fósforo seja favorecida.



Terminada a oxidação do silício, gerando um aumento de temperatura e formação de uma emulsão metal, gás e escória, cria-se uma condição em que a única reação importante é a descarburação, diminuição do teor de carbono, representado pelas equações 13 e 14, cuja velocidade de reação é limitada pela disponibilidade de oxigênio.



Durante estas reações, os óxidos de ferro e manganês da escória são reduzidos, dando origem a um aumento do teor de manganês no metal. Com a continuação do sopro, ocorre um aumento gradativo da oxidação deste manganês e uma diminuição na velocidade de descarburação.

Ao longo do processo, amostragens do aço líquido são realizadas para se verificar parâmetros como os teores de carbono, oxigênio e temperatura, a fim de que se possa tomar ações corretivas imediatas. Finalizado o refino, o convertedor é basculhado e o aço líquido é vazado com a posterior adição de ferro-ligas, que irão, por sua vez, proporcionar ao aço as propriedades mecânicas exigidas para o produto.

4.3.2 Forno elétrico a arco

O forno elétrico a arco é um forno industrial de fusão à eletricidade, o que faz com que este reator metalúrgico seja independente das reações químicas e permita que a carga do forno seja composta por gusa sólido, sucata e ferro-ligas. Isso possibilita a produção de aços com cargas compostas por 100% de sólidos.

Durante a operação, uma fonte de energia elétrica alimenta os eletrodos de grafite que penetram no forno através de aberturas em suas abóbodas. Entre os eletrodos e a carga metálica tem-se a formação do arco voltaico, que libera grande quantidade de calor, resultando assim na fusão da carga metálica (SILVA, 2011).

Tipicamente, são necessários de dois a três carregamentos no forno, uma vez que a sucata ocupa um volume muito maior que o aço líquido. No primeiro carregamento, o cestão contendo a carga é posicionado sobre o forno com a abóbada totalmente aberta. Posteriormente, o forno é ligado e inicia-se a formação da primeira poça de aço líquido que é aumentada até que a maior parte da carga metálica seja derretida.

Ainda com alguma sucata presente no interior do reator, faz-se o segundo carregamento e é continuado o processo de fusão até que se derreta toda a carga metálica, e o aço líquido apresenta temperaturas em torno de 1570 °C. A partir daí, passa-se para o processo de refino, responsável pelo acerto da composição química do aço e a retirada das impurezas. Este processo ocorre pela injeção de oxigênio e é caracterizado pela elevação da temperatura e a formação de escórias que ajudam a proteger o forno contra a radiação térmica.

Após o processo de descarburização é possível adicionar o restante dos elementos sólidos necessários para se atingir o peso desejado da corrida. Quando a temperatura estiver ajustada, o metal é vazado.

4.4 LINGOTAMENTO E LAMINAÇÃO

Posteriormente ao refino e à produção do aço, o aço líquido é direcionado para uma panela de vazamento e encaminhado para um canal de distribuição que desemboca em moldes. Os moldes têm suas paredes resfriadas por jatos de água e, desse modo, o aço se solidifica e toma a forma de semiprodutos.

Em seguida, o aço é submetido a tratamentos térmicos e a conformações mecânicas para que adote as dimensões desejadas do produto, que podem ser desde chapas e perfil a arames e pregos. A laminação pode ocorrer à temperatura ambiente ou em temperaturas mais elevadas. O metal, anteriormente resfriado no lingotamento, é reaquecido novamente e atinge temperaturas em torno de 1200 °C. Em seguida, os lingotes passam entre dois cilindros que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários, acarretando em mudanças significativas em sua espessura e largura, obtendo-se assim os diversos produtos laminados prontos para a comercialização (LOPES, 2018).

5 ECONOMIA CIRCULAR

O modelo de produção predominante desde a industrialização é o linear, caracterizado pela extração de recursos naturais, transformação destes em bens de consumo e posterior descarte dos mesmos. Com isso, há uma intensa geração de resíduos e rejeitos e a dissipação de energia ao longo do processo produtivo. O modelo de produção vigente pressupõe a exploração intensiva de recursos naturais e também se caracteriza pelo descarte acelerado e precoce dos bens consumidos.

Porém, a escassez dos recursos não renováveis e o aumento da população mundial vêm pressionando os processos produtivos a se tornarem mais sustentáveis, colocando à prova o modelo da economia linear.

O modelo circular, diferentemente do linear, promove a reutilização de coprodutos, subprodutos e resíduos como matérias-primas em outras cadeias produtivas, prolongando assim a vida útil dos mesmos e reduzindo a demanda pela extração de recursos não renováveis, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Comparativo entre os modelos econômicos linear e circular



Fonte: Instituto Aço Brasil (2020)

Porém, é essencial que ao se produzir um material, o seu ciclo de vida já esteja mapeado, inclusive os resíduos gerados. A reflexão de reaproveitamento de resíduos não deve ocorrer apenas quando os resíduos já foram gerados. Pelo contrário, a concepção de um produto deve ser desenhada, considerando todo o ciclo de vida do material.

6 SUBPRODUTOS SIDERÚRGICOS

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2020), no ano de 2020 a geração de resíduos e coprodutos foi de 622 kg para cada tonelada de aço produzido. Considerando que neste mesmo ano a produção brasileira de aço foi de 27,9 milhões de toneladas, pode-se dizer que somente o Brasil produziu 17,35 milhões de toneladas de resíduos. Deste total, aproximadamente 75% é oriundo do processo de refino e redução (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

O ponto positivo é que no mesmo período 93% do resíduo gerado foram reaproveitados e apenas 5% apresentou disposição final (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

6.1 Escórias

6.1.1 Usos de escória de altos-fornos

A escória de alto-forno, como mencionado anteriormente, é um resíduo siderúrgico não metálico, proveniente do processo de redução dos minérios de ferro e produção do ferro gusa. Esse resíduo é constituído fundamentalmente por silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos e, secundariamente, por sulfetos de cálcio e manganês, além de óxidos de ferro e manganês. A escória é obtida pela combinação da ganga (impurezas) dos minérios com fundentes apropriados e cinzas do combustível utilizado, carvão ou coque.

As escórias provenientes de indústrias que utilizam alto-fornos alimentados com carvão vegetal geralmente são ácidas, enquanto as escórias provenientes de fornos movidos a coque são básicas (JOHN; AGOPYAN, 2000).

A composição química e o método de resfriamento aplicado influenciam as características físicas da escória, como a densidade, porosidade e tamanho das partículas, com implicações diretas sobre as possibilidades de aplicações.

A escória líquida, que é resfriada bruscamente por meio de jatos de água em alta pressão, sofre uma solidificação rápida não possibilitando a formação de núcleos cristalinos, mantendo suas características de hidraulicidade. Apresenta-se como um material granular com formato anguloso, textura áspera, distribuição granulométrica de aproximadamente 0,2 mm, densidade aparente de 1,0 g/cm³ e coloração esbranquiçada, amarelada, acinzentada ou acastanhada (ALMEIDA, 2014). Devido às suas características hidráulicas, é possível produzir, por ativação ou combinação com a cal liberada pela hidratação do clínquer, produtos aglomerantes similares aos gerados pelo cimento Portland, com ampla utilização na produção de agregados graúdo e miúdo, argamassas, painéis, tijolos e blocos de vedação vertical, além de pré-fabricados e artefatos de concreto e, principalmente, como adição a cimentos e concretos (SILVA, 2005)

A escória resfriada ao ar é formada através da perda lenta de calor, em um local ao ar livre, originando um produto cristalizado e maciço, que após ser britado apresenta granulometria variando de 12,5 mm a 150 mm, massa específica entre 2,0 e 2,8 kg/dm³. O material apresenta formato anguloso, cavidades internas, natureza vesicular e áspera, o que lhe dá uma maior superfície específica em relação aos outros agregados. Além disso, ela possui boa resistência à desintegração frente às condições climáticas, a líquidos corrosivos e a mudanças bruscas de temperatura (ALMEIDA, 2014). Este tipo de escória, por apresentar dureza e resistência à

abrasão, é utilizado como agregado graúdo para o concreto, pavimentações asfálticas, composição de lastros de vias férreas e bases de estradas.

6.1.1.1 Fabricação de cimento Portland

A principal forma de coprocessamento da escória de alto-forno é a sua adição ao cimento Portland. A primeira menção a este tipo de aplicação data de 1774, quando Lorient comenta o descobrimento das propriedades cimentícias das escórias em mistura de escória e cal. No Brasil, a fabricação de cimento Portland se iniciou em 1952 pela Cimento Tupi S.A, em Volta Redonda, com a produção de 72 mil toneladas e sua normalização data de 1964 (ALMEIDA, 2014).

O cimento Portland composto consiste em uma mistura íntima, ou seja, finamente moída, quimicamente e fisicamente homogênea de escória de alto-forno com clínquer Portland. Este cimento pode ser produzido moendo o clínquer Portland com a escória granulada de alto-forno seca, juntamente com gipsita, que é um minério de sulfato de cálcio hidratado, ou misturando-se a seco o clínquer Portland já moído com a gipsita e a escória granulada, também moída. A quantidade de escória adicionada ao processo varia de acordo com o tipo de cimento a ser produzido. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece dois tipos de cimentos que utilizam a escória como adição mineral, que são o CP II - E (cimento Portland composto) e CP III (cimento Portland de alto forno), o primeiro possui adição de 6 a 34% de escória e o segundo de 35 a 70% (SCHNEIDER, 2005).

Do ponto de vista ecológico, a produção de cimentos Portland com adição de escória de alto-forno é vantajosa se comparada ao cimento Portland comum, visto que a substituição parcial do calcário pela escória gera economia de energia devido à redução do calor de formação do clínquer e a diminuição da formação de gases, especialmente o CO₂. Do ponto de vista estrutural, o cimento Portland apresenta diferenças quanto aos aspectos de durabilidade, minimização da reação expansiva álcali-agregado, diminuição da permeabilidade, diminuição do calor de hidratação, diminuição da retração, aumento da resistência ao ataque por sulfatos e aumento da resistência mecânica à compressão em idades mais avançadas. O ponto de atenção que deve ser considerado é que a reação de hidratação dos cimentos com escória é inicialmente mais lenta do que a do cimento Portland comum, deste modo, o cimento contendo escória apresenta resistências mais baixas nas idades iniciais (MENÉNDEZ; BONAVETTI; IRASSAR, 2003).

6.1.1.2 Produção de concretos como adição mineral

A adição de escória de alto-forno em concretos, tanto no estado endurecido quanto no fresco, pode trazer melhorias significativas ao material. A mistura se torna um material mais fluido e coeso devido à melhor distribuição das partículas de escória no produto, e ao fato da superfície da escória ser lisa, o que faz com que ela absorva pouca água e proporcione um desprendimento de calor mais lento (ALMEIDA, 2014).

No estado fresco do concreto, a mistura de escória de alto-forno melhora a resistência do concreto à fissura térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos. Já no estado endurecido, reduz o calor de hidratação, provocando uma fissuração térmica menor, isto é, uma menor permeabilidade, ocasionando uma maior resistência química (CALIXTO, 2005).

Uma característica relevante ao analisar concretos é a sua resistência à flexão, que se apresenta maior em concretos com incremento de escória moída, se comparado a concretos normais. Isso se deve à maior aderência entre a pasta de cimento, a escória de alto-forno e os agregados, por causa da forma e da textura da superfície das partículas de escória. Esse fato também pode ser atribuído à melhora da microestrutura na interface pasta-agregado (COELHO, 2002).

Outra característica importante é a resistência mecânica. Em concretos com a adição de escória, há um endurecimento mais lento do material, quando comparado com o concreto de cimento Portland convencional, que se prolonga até idades mais avançadas e por vários anos.

Essas características somadas à maior durabilidade, melhor desempenho frente à difusão de cloretos, menor expansão devido ao ataque de sulfatos, maior resistividade elétrica e menor suscetibilidade a reação álcali-agregado, vêm incentivando a utilização deste material. Com substituições de 25% a 40% de cimento, o projeto Air Train JFK em Nova York é um exemplo da utilização das escórias de alto-forno como adição no concreto, onde foram aplicados 182 mil metros cúbicos de concreto com adição de escória de alto-forno moída (MASSUCATO, 2005).

6.1.2 Usos de escória de aciaria

6.1.2.1 Obras rodoviárias e ferroviárias

A maior aplicação das escórias de aciaria tem sido na forma de agregados em estradas e pavimentações. Países como Brasil, Reino Unido, Japão, Estados Unidos, Canadá e Coreia do

Sul utilizam-se deste resíduo siderúrgico em sub-bases e pavimentação asfáltica em substituição a matérias-primas naturais, como brita e areia de rio (SANTOS, 2013).

No Brasil é mais comum a utilização das escórias de aciaria como base ou sub-base rodoviárias, enquanto que em países europeus, estas escórias são utilizadas na composição da camada asfáltica.

As vantagens que este material apresenta, se comparado aos agregados convencionais, são menor custo, visto que não são necessários gastos com desmontes, maior coeficiente de atrito, maior densidade, acarretando uma diminuição das camadas de pavimentos, textura rugosa, conferindo melhor adesão às misturas asfálticas e, por fim, maior resistência à abrasão e desgaste (NEVES, 2018).

6.1.2.2 Fabricação de vitrocerâmicos

Vitrocerâmicas são materiais policristalinos produzidos a partir da cristalização controlada de artigos de vidro. Os vidros suportam grandes quantidades de elementos diferentes em solução, sendo, portanto, ideais para assimilar escórias complexas em suas composições.

Diante disso, uma pesquisa foi desenvolvida pelo Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, em conjunto com a Usiminas. Os experimentos comprovaram que é possível utilizar a escória de aciaria para o desenvolvimento de vidros e da vitrocerâmica, considerando suas propriedades superiores às cerâmicas convencionais. Segundo a pesquisa, as placas de vidros e vitrocerâmicas produzidas com escória de aciaria são ideais para revestimentos arquitetônicos, competindo com os tradicionais produtos, pois apresentam características mais atrativas que as das cerâmicas convencionais, como uma maior resistência mecânica (não quebram facilmente) e à abrasão (suportam tráfego intenso de pessoas e de máquinas pesadas) (FERREIRA, ZANOTTO, SCUDELLER, 2002).

6.1.2.3 Recifes artificiais tetrápodes

O centro de Tecnologia da NKK, Siderúrgica japonesa, desenvolveu blocos de escória de aciaria em formato de recifes artificiais marítimos, com o objetivo de promover a biodiversidade e o desenvolvimento sustentável para o território japonês (SILVA, 2015).

Em 1997, os recifes artificiais foram introduzidos no fundo do mar da costa da cidade de Hiroshima e, no ano seguinte, foi possível identificar o crescimento de plantas marinhas e de peixes ao redor dos blocos. Este fato ocorreu, pois, a superfície dos blocos feitos de escórias é

porosa e composta por carbonato de cálcio (CaCO_3), a mesma substância que compõe os recifes, promovendo a ampliação da quantidade de espécies de plantas e animais marinhos nos blocos e em suas proximidades. Outro fator que potencializou o desenvolvimento do ecossistema foi o pH neutro do material, que não agride o meio ambiente (SILVA, 2015).

No Brasil, um projeto parecido foi desenvolvido pela ArcelorMittal Tubarão, no Estado do Espírito Santo, em parceria com o Instituto Ecos. A iniciativa consistia em instalar centenas de recifes construídos com escória de aciaria, como pode ser observado na Figura 7, em forma de pirâmides, ao longo da costa capixaba. Além disto o projeto englobava ações de educação ambiental e geração de renda para a comunidade envolvida (ARCELORMITTAL BRASIL, 2009).

Figura 7 – Recife artificial



Fonte: Silva (2014)

6.1.2.4 Barreiras para dissipação de ondas naturais

Durante muito tempo utilizou-se blocos de pedras naturais como dissipadores de energia das ondas marítimas, porém estes materiais não possuíam formas padronizadas que dificultavam um melhor arranjo entre elas e fazendo com que, em um curto espaço de tempo, a força do mar vencesse estas barreiras. Porém, com a escória de aciaria é possível construir blocos, como apresentado na Figura 8, para serem utilizados para dissipar energia das ondas marítimas, obtendo uma forma de barreira única contra as marés, já que com a execução da barreira com

escória siderúrgica não só se obtém um elemento de peso, como também uma maior resistência ao impacto (SILVA, 2015).

Figura 8 - Blocos com escória, Golfo pérsico, Iran



Fonte: Silva (2015).

6.1.2.4 Fertilizante na agricultura

O primeiro uso de escória de aciaria como fertilizante é datado de 1859 na Inglaterra. Porém esta prática só foi regulamentada pelo Japão, que determinou que este produto é potencialmente composto de minerais que controlam a acidez do solo, auxiliam no controle de pragas e melhoram a qualidade do produto.

Como exemplos de aplicação, têm-se a siderúrgica Chinesa Taiyuan Iron & Steel, que desenvolveu um fertilizante de escória de aciaria rico em silicato de cálcio. Esse composto tem apresentado resultados positivos para a agricultura chinesa, visto que dados estatísticos revelam que 50 milhões de hectares são insuficientes em silício no seu solo, além de sofrer com os efeitos da chuva ácida nas explorações de mineração e carvão (SILVA, 2015).

No Brasil, existem três empresas que utilizam a escória para agricultura: a Harsco Metals Minerais, multinacional americana, instalada principalmente na região sudeste; a Silifétil, empresa nacional, localizada no município de São Joaquim de Bicas, Minas Gerais; e a PHI, empresa nacional localizada no município de Cláudio, Minas Gerais, e no estado do Rio de Janeiro (SILVA, 2015).

6.2 Finos de minério

Os finos de minério separados no processo de peneiramento do minério granulado não são utilizados diretamente nos fornos de redução devido à sua granulometria. Estes materiais passam por processos de aglomeração, chamados sinterização e pelletização, gerando respectivamente sínter, Figura 9 (a), e pelota, Figura 9 (b).

Figura 9 – (a) Sínter e (b) pelotas



Fonte: Brazilian Iron Ore (2020) e NBA (2019)

O processo de sinterização consiste basicamente em misturar os finos de minério de ferro, fundentes, combustíveis sólidos e resíduos siderúrgicos, sendo a mistura resultante alimentada em uma grelha móvel permeável e submetida a um processo contracorrente. Além de aglomerar, o processo almeja aumentar o tamanho físico das fontes de minério de ferro para formar um material de alta porosidade e, conseqüentemente, boa redutibilidade.

O processo de pelletização envolve basicamente três etapas que são a preparação das matérias-primas, formação das pelotas cruas e processamento térmico. Na preparação, assim como na sinterização, é preparada uma mistura que passa para o processo de pelletamento. Esta etapa tem por objetivo produzir pelotas numa faixa de tamanhos apropriada, além de resistência mecânica suficiente, para suportar as etapas de transferência e transporte entre os equipamentos de pelletamento e o de tratamento térmico. No forno de pelletização, as pelotas cruas são submetidas a um processamento térmico a fim de conferir alta resistência mecânica e características metalúrgicas apropriadas.

Os bolos de sínter medem cerca de alguns centímetros de diâmetro, tendo um consumo no ano de 2021 de 28 milhões de toneladas. Já as pelotas são aproximadamente esféricas,

apresentando cerca de 12mm de diâmetro, com um consumo de 10 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022E).

6.3 Moinha de biorredutor

O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de carvão vegetal do mundo. O setor siderúrgico consome anualmente cerca de 12 milhões de toneladas de carvão vegetal. O problema desta matéria-prima é sua fragilidade, fazendo com que ela sofra várias quebras devido a movimentações mecânicas, desde a sua obtenção nas carvoarias até o seu efetivo consumo nos altos-fornos. Toda a movimentação provoca quebras gerando cerca de 25% de finos com granulometria inferior a 9 mm, denominada de moinha de carvão vegetal, ou moinha de biorredutor (GERDAU FLORESTAL, 2016).

Muitas indústrias, como a de cimento, cerâmica e a de cal, por exemplo, utilizam-se da moinha de biorredutor como combustível em suas operações. Porém a maior parte é consumida nos altos-fornos a carvão vegetal equipados com sistema de injeção, os quais visam suprir o fornecimento de combustível.

O processo de injeção de carvão pulverizado ou ICP consiste na injeção, através das ventaneiras, de finos de carvão pulverizado e seco. A combustão desse material é bastante rápida, uma vez que ele apresenta grande área de contato, além de ser injetado em uma zona de alta temperatura e em contato direto com o oxigênio soprado.

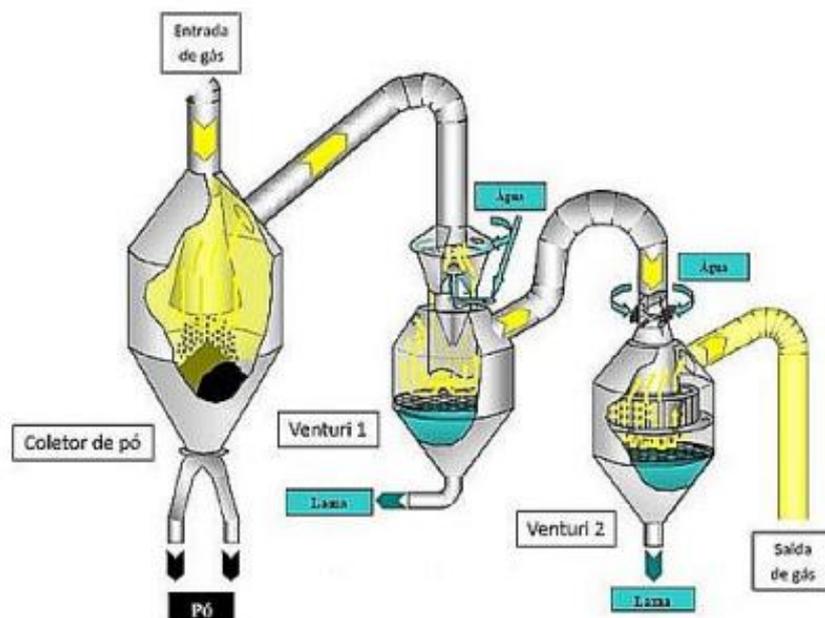
Porém, cerca de 80% dos altos-fornos a carvão vegetal não possuem sistema de injeção, gerando um excesso de moinha disponível no mercado, no mínimo 1 Mt/ano. Sendo assim, é possível reutilizar este material para a produção de coque metalúrgico (GERDAU FLORESTAL, 2016). Os experimentos realizados por Silva (2008) revelam que houve aumento da reatividade do coque e diminuição da sua resistência mecânica com a intensificação do uso de finos de biorredutor na mistura, fato atribuído ao caráter inerte e bastante poroso do aditivo.

Outra possibilidade de utilização, fora do cenário siderúrgico, é o uso da moinha de carvão vegetal na composição de substratos para plantas. A moinha de biorredutor, dependendo da quantidade utilizada no substrato e da espécie, pode influenciar positivamente no desenvolvimento de plântulas e/ou mudas. Segundo Freitas (2013), a mistura de carvão vegetal a materiais orgânicos favorece a eficácia como aditivo em substratos, justamente em função dos grupos carboxílicos aromáticos estáveis em sua composição nutricional, promovendo maior retenção de nutrientes e exercendo redução na digestão de matéria orgânica por microrganismos no solo.

6.4 Pó de balão

Os componentes da carga carregada no alto-forno possuem finos agregados, que durante o processo de redução se desprendem no interior do alto-forno e são arrastados pelo gás ascendente. Para que esta exaustão que contém sólidos seja utilizado como combustível ao longo do processo e não cause problemas como entupimento de bicos, desgaste de equipamentos por abrasão, etc., o mesmo é direcionado a um conjunto de equipamentos denominado Sistema de Limpeza de Gás como demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de limpeza de gás de um alto-forno.



Fonte: Silva (2016)

A primeira etapa de limpeza é realizada no balão gravitacional (coletor primário), que tem por finalidade reter as partículas mais pesadas. Nessa etapa, a limpeza é a seco. O pó perde velocidade, sedimenta no fundo do equipamento, de onde é retirado posteriormente. As demais etapas de recuperação do pó são realizadas em lavadores tipo Venturi, que são equipamentos industriais encarregados de limpar a corrente gasosa dos poluentes através do aumento da velocidade da corrente de ar em sua garganta e a injeção do líquido de lavagem através de orifícios localizados em sua parede.

O pó obtido apresenta composição variada a depender da matéria-prima utilizada no processo. Porém, ele é composto aproximadamente por 25 a 40% de Fe; 40 a 45% de C; 5 a 7% de SiO_2 e 2 a 4% de CaO (SILVA, 2016). Portanto, de maneira geral, o pó de balão é constituído por metais e óxidos metálicos (oriundos do minério, sinter e pelotas), finos de material carbonoso

(oriundos do carvão e coque) e outros minerais em menor proporção. Vale destacar também que o pó de balão apresenta elevados teores de fenóis (C_6H_5OH).

O pó de balão, assim como os finos de minério e de moinha de biorredutor, pode ser utilizado no processo de sinterização. No entanto, é preciso observar o teor de fenóis, que em alguns casos estão acima do limite admissível de 10 mg/kg. Uma outra possibilidade de destinação adequada para este resíduo pode ser a indústria de cerâmica vermelha ou estrutural, que compreende todos os produtos que apresentam cor vermelha após a queima, resultante da oxidação dos compostos de ferro, presentes no pó do balão ou liberado pela argila. Os produtos fabricados por esse setor são tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais e agregados leves de argila expandida (JORDÃO; ZANDONADI, 2002).

A utilização da mistura argila e pó do balão é possível considerando que ambas são constituídas de material inorgânico oxidado, mais carbono, sendo compatível quimicamente com os argilominerais utilizados na produção de artigos de cerâmica vermelha. Os metais presentes no pó do balão podem ser incorporados na rede cristalina do material cerâmico, sob condições de mistura e queima ideal, promovendo a imobilização de metais pesados, tornando o produto inerte em relação aos processos de lixiviação e de solubilização.

6.5 Lama de alto-forno

A lama de alto-forno é obtida após a etapa de lavagem e separação dos particulados sólidos do gás de alto-forno pelos lavadores Venturi, arrastando consigo poeiras que não podem ser lançadas na atmosfera.

O aproveitamento da lama do alto-forno é dificultado pela fina granulometria do material, elevados teores de cinza e umidade e pela presença de metais pesados em sua composição como zinco e chumbo, que impossibilitam a reciclagem direta deste resíduo por causarem problemas operacionais ao processo.

Uma das possibilidades de se reutilizar este material é na produção de sinter e pelota. Porém para que isto seja possível, é necessário realizar tratamentos para retirada dos metais pesados da lama. Dentre os tratamentos físicos, destacam-se a separação magnética. Já os tratamentos químicos abrangem a via pirometalúrgica (volatilização seletiva, escorificação, etc.) e a via hidrometalúrgica (lixiviação seletiva, precipitação, cementação, extração por solventes etc.) (LOBATO; VILLEGAS; MANSUR, 2013).

Outra possibilidade de utilização é na indústria de cerâmica vermelha, visto que a lama de alto-forno é um resíduo que apresenta granulometria e composição mineralógica apropriada

para a incorporação destes materiais. Seu emprego contribui para aumentar a absorção de água, reduzir a tensão de ruptura à flexão e aumentar a retração linear da cerâmica queimada, além de colaborar para a economia energética durante a etapa de queima.

De maneira geral, a lama de alto-forno, por ser um resíduo rico em ferro, vem atraindo muito interesse. Várias pesquisas buscam retirar o zinco e o chumbo contidos nela para que se possa reciclá-la, através de pelotas, sinter ou briquetes, no próprio processo siderúrgico, como por exemplo o trabalho de Zeydabadi et al. (1997) que propõe a lixiviação seletiva por ácido sulfúrico em baixas concentrações e temperatura ambiente que recupera aproximadamente 80% do zinco. Além desta possibilidade, foi realizado um estudo sobre a recuperação dos teores de zinco e chumbo presentes na lama, com o uso de um forno giratório (forno de Waelz) no processo. Nesse trabalho é descrita a possibilidade de volatilizar com sucesso 95% do Zn, 95% de Pb, 30% de enxofre e 30% de óxido de potássio de uma mistura contendo 44% de Fe, 4.5% de Zn, 2% de Pb e 7% de carbono, presentes na lama de alto-forno (SERBENT; MACZEC; RELLERMEYER, 1975).

Porém, nenhum método encontrado é viável ainda para a aplicação industrial. Em relação à reutilização da lama na fabricação da cerâmica vermelha, apesar de totalmente viável, o volume aplicado ainda é pequeno.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos a reutilização de subprodutos de processos industriais se tornou uma ferramenta estratégica do ponto de vista ambiental, econômico e competitivo, uma vez que matérias-primas de menor valor agregado são capazes de serem utilizadas em outras cadeias de produção ao invés de serem descartadas no meio ambiente.

Nos processos envolvidos na indústria siderúrgica, os principais subprodutos gerados são os pós representados pelo pó de balão, os finos de minério e a moinha de biorredutor, a lama do alto-forno e as escórias representado pela escória de alto-forno e a escória de aciaria.

Muitas das práticas de reaproveitamento já são comuns e consolidadas no mercado, como é o caso da utilização da escória pela indústria de cimento além de sua aplicação em obras rodoviárias e ferroviárias, a utilização de finos de minério na produção de sinter e pelotas que retornam ao processo siderúrgico como carga metálica e a utilização de moinha de biorredutor no processo de injeção de carvão pulverizado, visando a diminuição do consumo de carbono via topo do alto-forno. Porém, ainda existem muitas oportunidades para o desenvolvimento de novas destinações dos subprodutos gerados, como é o caso do reaproveitamento das escórias de aciaria para a produção de corais e a reutilização da lama de alto-forno na produção de sinter e pelota. A necessidade de se adotar, o quanto antes, os conceitos da economia circular, é devido ao esgotamento de recursos não renováveis, na restauração e conservação do meio ambiente e a consequente sobrevivência de gerações futuras

REFERÊNCIAS

- ARCELORMITTAL BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2009**. Belo Horizonte, 2009.
- ALMEIDA, G. M. **Utilização de Escória Produzida em Alto-Forno a Carvão Vegetal como Agregado Graúdo e Miúdo para Concreto**, 2014, 133f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará Instituto de Tecnologia, 2014.
- ANBA. **Vale produziu menos pelotas em Omã**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://anba.com.br/vale-produziu-menos-pelotas-em-oma/>
- BRAZILIAN IRON ORE. **Exportações Brasileira de Sinter de Minério de Ferro**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianironore.com.br/pt/sinter-de-ferro>
- BRITO, J.O.; LACLAU, J.P.; RIOM, M.; QUIRINO, W.F. **Le charbon de bois au Brésil. Bois et Forêts des Tropiques**, Paris, v.2, n.288, p.58-59. 2006.
- CALIXTO, J. M. F. **Efeito da utilização de diferentes tipos de concreto no comportamento e na resistência de lajes mistas com forma de aço incorporada**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, [S.l.]. Anais... [S. l.: s.n], IBRACON, 2005.
- COELHO, M. A. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**, 2002, 40 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.
- FERREIRA, E. B.; ZANOTTO, E. D. SCUDELLER, L. A. M. **Nano Vitrocerâmica de Escória de Aciaria**. Quim. Nova, Vol. 25, No 5, 731-735, 2002.
- FREITAS, A. F. **Adição de Carvão Vegetal no Substrato para a Formação de mudas de leguminosas Arbóreas**, 2013, 106f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 2013..
- GEERDES, M.; TOXOPEUS, H.; VLIET, C. V. **Modern Blast Furnace Ironmaking: An introduction**. 2ª ed. Amsterdam: IOS Press BV, 2009.
- GERDAU FLORESTAL. **Treinamento Interno de Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. 2016.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Corredores Logísticos- Minério de Ferro**, 2018. Disponível em: <<https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=Corredores+Log%C3%ADsticos#publication>> . Acesso em: 29 julho 2023.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço & Economica 2022**. Rio de Janeiro, 2022A

- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço & Sustentabilidade 2022**. Rio de Janeiro, 2022E
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2022**. Rio de Janeiro, 2022B
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2023**. Rio de Janeiro, 2023
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Siderurgia 2022**. Rio de Janeiro, 2022C
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Mercado Brasileiro do Aço 2022**. Rio de Janeiro, 2022D
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. Rio de Janeiro, 2020
- JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de escória de alto forno no Brasil**. São Paulo: ‘Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais’, Anais de um Seminário Nacional, 2000
- JORDÃO, M. A. P.; ZANDONADI, A. R.. Informação técnica. *In: ABC - Associação Brasileira de Cerâmica*. Anuário Brasileiro de Cerâmica. São Paulo, 2002, p.26-64.
- 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 Minério e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology*, 2013, Goiânia, GO, 2013.
- LOPES, L. G. **Aproveitamento Sustentável de Coprodutos da Indústria Siderúrgica e da Mineração no contexto da Economia Circular**, 2018, 42f. Monografia – Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- MASSUCATO, C. J. **Utilização de Escória de Alto-Forno à Carvão Vegetal como Adição no Concreto**, 2005, 105f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005.
- MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, E.F.; IRASSAR, E. **Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag**. *Cement & Concrete Composites*, v. 25, n.1, p.61-67,2003.
- MOURÃO, M. B. *et al.* **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- NEVES, M. S. **Aproveitamento da Escória de Aciaria nas Indústrias**, 2018, 37f. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2018.
- PEREIRA, S.A. C. **O Mercado de Minério de Ferro**, 2012, 47f. Monografia de Especialização - Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- RANGEL, E. P. **Desenvolvimento de uma análise Sistêmica de Cenários Prospectivos para**

o Setor de Pelotas de Minério de Ferro Brasileiro, 2012, 87f. Dissestação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2012.

RIBEIRO, E. D. L. **Estudo comparativo entre sistemas de limpeza de gases de alto-forno em siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal e alternativa de reaproveitamento do pó do balão**, 2011, 92f. Tese de Doutorado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.

SANTOS, L. M. M.. **Siderurgia para cursos tecnológicos**. v. 1000. 154p. Ouro Preto, ETFOP, 2007.

SANTOS, R. C. Dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 122 f. Tese de Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2010.

SANTOS, P. B. **Estudo da Utilização de Escória de Alto-Forno como Agregado Graúdo em Concretos Fabricados em Marabá**. 2013. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Marabá, 2013.

SATURNINO, J. C. S. F. **Grafite de kish: aspectos gerais, caracterização e purificação**, 2019, 141f. Dissestação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais, Universidade Federal de Viçosa, Florestal, Minas Gerais, 2019.

SERBENT, H.; MACZEC, H.; RELLERMEYER (1975). **H. Large-scale test for the treatment of BF sludge and B.O.F. dust according to aelz process (retroactive coverage)**. *In: Iron making proceedings*, vol. 34; 1975. 194-205p.

SILVA, A. M. **Estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral utilizado no processo de fabricação do ferro gusa em Alto-Forno**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

SILVA, H. P. S. **Efeito da adição de pó de balão na combustibilidade do carvão pulverizado injetado no alto-forno**. Dissestação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências – Físicas de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SILVA, J. G. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno**. 2005. 225f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

SILVA, J. N. dos S. **Siderurgia**. 1ª ed. Belém do Pará. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. 2011.

SILVA, V. C. **Análise da potencialidade de uso da escória de aciaria como matéria-prima alternativa na produção de pisos intertravados**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, V. C. **Estudo da viabilidade da utilização da escória de aciaria como matéria prima alternativa em novos produtos.** *In:* 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE DESIGN, 2014, Gramado, RS. Anais [...] Blucher Design Proceedings, 2014, p. 2114-2125.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes período de cura: avaliação ASTM C1202 X imersão em solução salina.** 2005. 154f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2005.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **World steel in figures 2023.** Bélgica. 2023.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Worldsteel Short Range Outlook April 2023,** 2023. Disponível em: <[https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/worldsteel-short-range-outlook-april-2023/#:~:text=The%20World%20Steel%20Association%20\(worldsteel,2024%20to%20reach%201%2C854.0%20Mt.\)](https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/worldsteel-short-range-outlook-april-2023/#:~:text=The%20World%20Steel%20Association%20(worldsteel,2024%20to%20reach%201%2C854.0%20Mt.))>. Acesso em: 21 maio 2023.

ZEYDABADI, B.; MOWLA, D.; SHARIAT, M.H.; KALAJAHI, J. **Zinc recovery from blast furnace flue dust.** Hydrometallurgy 47(1), 1997, pp. 113-125.