

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Ciências Econômicas
Centro de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração
Programa de Especialização em Gestão Estratégica e Sustentabilidade

Julimar Pedro de Oliveira

**ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES
METALIZADOS E SUA UTILIZAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE FERRO-GUSA**

Belo Horizonte
2023

Julimar Pedro de Oliveira

ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO DA FABRICAÇÃO DE BRIQUETES METALIZADOS E SUA UTILIZAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE FERRO-GUSA

Versão Final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Estratégica e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Ricardo Luiz Perez Teixeira

Coorientadora: Prof. Jacqueline Braga Paiva Orefici

Belo Horizonte

2023

Ficha catalográfica

O48e
2023

Oliveira, Julimar Pedro de.
Economia circular [manuscrito]: estudo de caso da fabricação de briquetes metalizados e sua utilização na fabricação de ferro-gusa / Julimar Pedro de Oliveira . – 2023.
35 fl.

Orientador: Ricardo Luiz Perez Teixeira .
Coorientadora: Jacqueline Braga Paiva Orefici
Monografia (especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração.
Inclui bibliografia.

1. Administração. I. Teixeira, Ricardo Luiz Perez. II. Orefici, Jacqueline Braga Paiva. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração. IV. Título.

CDD: 658

Elaborado por Rosilene Santos CRB-6/2527

Biblioteca da FACE/UFMG. – RSS/23/2023



Universidade Federal de Minas Gerais
Faculdade de Ciências Econômicas
Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração
Curso de Especialização em Gestão Estratégica

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO do Senhor **JULIMAR PEDRO DE OLIVEIRA**, matrícula nº 2021719825. No dia 27/02/2023 às 18:00 horas, reuniu-se em sala virtual, a Comissão Examinadora de

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC, indicada pela Coordenação do Curso de Especialização em Gestão Estratégica - CEGE, para julgar o

Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES METALIZADOS E SUA UTILIZAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE FERRO-GUSA", requisito para a obtenção do Título de Especialista. Abrindo a sessão, o orientador e Presidente da Comissão, Prof. Ricardo Luiz Perez Teixeira, após dar conhecimento aos presentes do teor das Normas Regulamentares de apresentação do TCC, passou a palavra ao aluno para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, seguido das respostas do aluno. Logo após, a Comissão se reuniu sem a presença do aluno e do público, para avaliação do TCC, que foi considerado:

APROVADO

NÃO APROVADO

__92__ pontos (__noventa e dois pontos, 92%__) trabalhos com nota maior ou igual a 60 serão considerados aprovados.

O resultado final foi comunicado publicamente ao aluno pelo orientador e Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Senhor Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 27/02/2023.

Prof. Ricardo Luiz Perez Teixeira

Ricardo Luiz Perez Teixeira

Prof. Haroldo Lhou Hasegawa

Haroldo Lhou Hasegawa

Prof. Jacqueline Braga Paiva Orefici

Jacqueline Braga Paiva Orefici

Prof. Max Leandro de Araújo Brito

Max Leandro de Araújo Brito

Prof. Ricardo Teixeira Veiga

Ricardo Teixeira Veiga

Dra. Cynthia Helena Soares Bouças Teixeira

Cynthia Helena Soares Bouças Teixeira



Universidade Federal de Minas Gerais
Faculdade de Ciências Econômicas
Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração
Curso de Especialização em Gestão Estratégica

MODIFICAÇÃO EM TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Modificações exigidas no TCC do aluno **JULIMAR PEDRO DE OLIVEIRA**, matrícula nº 2021719825.

Modificações solicitadas:

_____ Adequar o texto
conforme orientação da banca. _____ avaliadora.

O prazo para entrega do TCC contemplando as alterações determinadas pela comissão é de no máximo 60 dias, sendo o orientador responsável pela correção final.

Prof. Ricardo Luiz Perez Teixeira

Ricardo Luiz Perez Teixeira

Julimar Pedro de Oliveira

Assinatura do aluno: **JULIMAR PEDRO DE OLIVEIRA**

Atesto que as alterações exigidas (x) Foram Cumpridas
() Não foram cumpridas

Belo Horizonte, 02 de março de 2023

Assinatura Professor Orientador _____

Ricardo Luiz Perez Teixeira

Agradecimentos

A pesquisa descrita ao longo deste artigo tornou-se possível graças à colaboração de profissionais, instituições e empresa. Os agradecimentos que se seguem são um justo registro de seu empenho. Agradeço aos pareceristas Professor Ricardo Teixeira Veiga (CEPEAD FACE UFMG), Professor Haroldo Lhou Hasegawa (UTFPR), Professor Max Leandro de Araújo Brito (UFRN) e Doutora Cynthia Helena Soares Bouças Teixeira (SMMA PBH) pelas importantes sugestões e recomendações ao texto do artigo sobre economia circular. Agradecemos à coordenação e ao pessoal do Curso de Especialização em Gestão Estratégica (Cege) da FACE UFMG por todo apoio e suporte na realização dos trabalhos relativos ao artigo. Agradecemos em especial à empresa Produtos Ambientais Metalúrgicos (PAM), que permitiu o acesso às informações pertinentes à economia circular relacionadas à PAM pelas entrevistas com o Sr. Marcelo Belisário (engenheiro e diretor de operações) e o Sr. Marcus Brandão (engenheiro da empresa). As entrevistas possibilitaram a construção consolidada deste artigo.

Economia circular: estudo de caso da produção de briquetes metalizados e sua utilização na fabricação de ferro-gusa

Circular economy: case study of the production of metallized briquets and their use in steel blast furnace

Julimar Pedro de Oliveira ¹, Ricardo Luiz Perez Teixeira ², Jacqueline Braga Paiva Orefici ³
Universidade de Minas Gerais - UFMG
Curso de Especialização em Gestão Empresarial (CEGE) / CE
julimarpoliveira@gmail.com, ricardo.luiz@unifei.edu.br, j.orefici@gmail.com

Resumo. Este artigo tem por objetivo compreender a contribuição do briquete metalizado na cadeia de produção do ferro gusa. Estudar e demonstrar quais são os fatores relevantes através dos quais o briquete agrega valor econômico e sustentabilidade e, finalmente, entender como esse produto se insere no tripé da sustentabilidade. A metodologia utilizada na pesquisa de informações foi de estudo de caso, de categoria descritiva. No estudo de caso é apresentado: a descrição, utilizando-se da expertise de uma empresa nacional que produz briquetes metalizados; a contextualização local, conforme a legislação vigente no Brasil; a pesquisa das indústrias que incorporam novas tecnologias que visam a diminuição da emissão dos gases de efeito estufa (GEE); e as informações das relações custo e benefício do briquete metálico na produção siderúrgica. Por fim o cenário internacional no que se refere à chamada economia circular, que aborda os aspectos ambientais das atividades na indústria siderúrgica com vistas para a diminuição das emissões de gás de CO₂ na atmosfera. O desempenho potencial dos briquetes metálicos dentro do contexto da economia circular permitiu concluir que o uso desse produto como parte de carga para Altos-fornos siderúrgicos permite obtenção de ganhos de sustentabilidade.

Palavras-chave: Briquete metálico; Economia Circular; Estudo de caso; Ferro-gusa.

Abstract. *This article aims to bring information about the development and manufacture of metallic briquettes, a product derived from the agglomeration of ore fines and melt shop sludge (solid waste), also known as co-products, and to understand how significant its contribution is in the chain of production of pig iron, what are the relevant factors through which the briquette adds economic value and sustainability for the sector, what is the relationship between this transformation of solid waste into briquettes and the tripod of sustainability. The methodology used will be the case study descriptive category, in which we have: the description, through the expertise of a metallic briquettes Brazilian company, the local context, according to current legislation in Brazil, information on the cost-benefit ratio of briquettes in steel production, and putting an end to the international scene with regard to the so-called circular economy, which addresses the environmental aspects of activities in heavy industry with a view to reducing CO₂ gas emissions into the atmosphere. The potential performance of metallic briquettes inside*

¹ Graduado em Gestão Comercial pela UNINTER (2020), Gerente Administrativo e Financeiro na Produtos Ambientais Metalúrgicos Ltda, São Joaquim de Bicas, MG, Brasil.

² Doutor em Ciências, Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ (2011), Professor no Instituto de Engenharias Integradas da Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil.

³ Doutora em Administração de Empresas (Università Politecnica delle Marche, UNIVPM, Itália, 2012), Pesquisadora do NEACONF - UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

circular economy context allow to conclude that use of these briquettes as a part of charge in steel blast furnaces is according with tripod of sustainability.

Keywords: *Case study; Circular Economy; Metal briquette; Pig iron.*

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1 Breve apresentação da empresa Produtos Ambientais Metalúrgicos (PAM).....	11
2.2 Produção de ferro-gusa.....	12
2.3 Sustentabilidade no setor siderúrgico.....	16
2.4 A economia circular, sustentabilidade.....	18
2.5 Ativo e passivo Ambiental.....	24
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
REFERÊNCIAS.....	34

Fonte: Elaborado pelos autores

1. Introdução

A chamada Economia Circular veio para pautar a agenda de toda a sociedade, empresas e governos. A responsabilidade social e ambiental, são hoje indissociáveis do trabalho das empresas que visam perpetuar suas atuações no mundo. Ideias que até então eram para redução de custos e aumento da lucratividade deram lugar para um novo conceito onde a sustentabilidade e o bem-estar social passam a fazer parte das estratégias empresariais. A capacidade de circularidade das matérias primas dos produtos, estão cada vez mais presentes na avaliação e exigências dos consumidores, que estão mais atentos às ameaças da sustentabilidade da própria vida na terra (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

As empresas metalúrgicas e siderúrgicas também estão se movimentando, uma vez que contribuem de forma significativa para essa nova ordem mundial. A busca pelo aumento da eficiência energética, pela diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a reciclagem e reaproveitamento de resíduos que elas mesmo geram, estão na ordem do dia. A sustentabilidade, de uma forma geral, é o objetivo das empresas (AVB, 2021).

Os insumos dos briquetes metalizados, objeto desse estudo, são em parte constituídos das lamas, dos pós e dos finos de minério-siderúrgicos, conhecidos como coprodutos. Eles representaram no ano de 2020, respectivamente 4% e 6% da geração de resíduos sólidos dos processos produtivos das siderurgias, segundo o Instituto Aço Brasil (IBS, 2020), em seu Relatório Anual de Sustentabilidade no Setor Siderúrgico.

Cerca de 94% da geração de resíduos sólidos é vendida a terceiros, que dão diferentes nomenclaturas e destinações técnicas conforme a área de atuação; exemplos: base e sub-base de estrada; nivelamento de terreno; uso agrônômico; agregados de concreto entre outros. O reaproveitamento desses resíduos por parte das próprias siderurgias consiste apenas em 2% do montante total, sendo que o estoque passivo já atinge cerca de 36% conforme dados de 2020 do (IBS).

A empresa PAM, com sua tecnologia de briquetagem dos resíduos sólidos, alinha-se com a proposta do projeto da ArcelorMittal (ARCELOR MITTAL, 2022), qual seja, medir e certificar as siderurgias que adotaram métodos e tecnologias que possibilitem a emissão zero dos gases de efeito estufa em sua produção industrial. Trata-se de uma busca por novas tecnologias, que permitam a certificação como sustentável e a creditação de carbono zero decorrente (AVB, 2021).

O projeto de descarbonização da produção siderúrgica apresentou-se como uma janela de oportunidade econômica e de caráter sustentável, portanto, a tecnologia de produção de briquetes metalizados (briquetagem) é uma das respostas ao desafio. Significa o aproveitamento dos rejeitos sólidos pelas próprias empresas geradoras, uma vez que elas podem consumir os briquetes metalizados no seu processo produtivo corrente.

Esses briquetes metalizados consistem na transformação das lamas, pós e finos de aciaria (finos de minério de ferro e outras substâncias) ou carepa de laminação em pequenos corpos aglomerados com a adição de aglomerantes e estabilizadores, que são prensados, a frio ou a quente, em dimensões variadas que servem como blocos sólidos.

As informações relacionadas a produção dos briquetes, que serão apresentadas ao longo do texto, demonstram o alinhamento da utilização desse produto com o projeto de sustentabilidade apresentado pela ArcelorMittal, possibilitando assim uma análise de sua relação com o contexto teórico da economia circular. Nesse sentido, o artigo buscou informações para um melhor entendimento de quais são as reais contribuições, técnica, econômica e de sustentabilidade que o uso do briquete metalizado poderia trazer para a cadeia de produção siderúrgica do ferro-gusa. Abordou-se, assim, a destinação dos rejeitos sólidos das empresas que empregam o briquete metálico e de sua relação com a sustentabilidade. Nesse caso, a abordagem da Economia Circular está assentada na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de resíduos sólidos e na economia de energia no processo siderúrgico possibilitada pelo uso de briquete metalizado.

2. Referencial teórico

2.1 Breve apresentação da empresa Produtos Ambientais Metalúrgicos (PAM)

A PAM empresa fabricante de briquetes metalizados foi concebida a partir da visão empreendedora do seu fundador o Eng^o Armênio de Lima e Silva (*in memoriam*), mineiro de Ponte Nova, MG. Como breve histórico do fundador da PAM, o Eng^o Armênio possui como *alma máter* a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ele graduou-se em engenharia de minas, metalúrgica e civil pela UFOP em 1953. Na década de 1990 inovou o negócio de insumos de concentrados de ferro para siderurgia com o produto de briquetes metalizados (PAM, 2023).

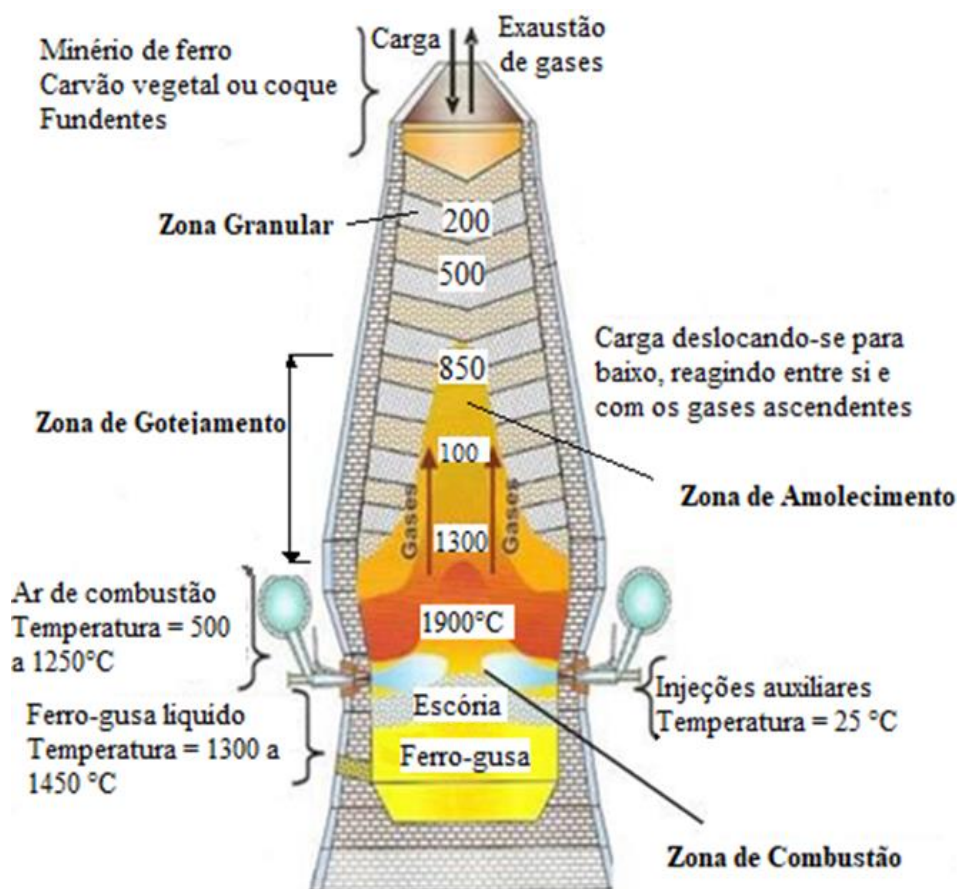
Para angariar e fortalecer o conhecimento sobre as reais demandas e exigências do setor produtivo, buscou a continuidade de formação durante sua carreira como Engenheiro na empresa Belgo Mineira, e em estágio profissional nas Minas da Belgo na Áustria, Luxemburgo e Alemanha. Seu conhecimento e formação possibilitou-lhe obter experiências administrativas de superintendência da ACESITA (atual Aperam South América em Timóteo, MG) e, finalmente com esta experiência e uma equipe profissional consubstanciada, ajudar na fundação da empresa (PAM, 2023).

2.2 Produção de ferro-gusa

O processo de redução do minério de ferro em ferro-gusa acontece nos reatores, chamados de Alto-forno. Segundo Medeiros *et al.* (2007), o reator, além das condições propícias à redução do minério de ferro, trabalha como um trocador de calor à contracorrente. A Figura 1 ilustra a alimentação das matérias-primas para a produção do ferro-gusa, o minério de ferro beneficiado na forma de pelotas (cerca de 65% de teor mássico de ferro) ou sinter (cerca de 63%), carvão beneficiado na forma de coque e fundentes que servirão para a purificação do ferro reduzido no minério, e que gerará um sobrenadante, denominado de escória.

O ferro-gusa é produzido em condições termodinâmicas pelos gases liberados pelo coque, gerados pelo calor fornecido pelos queimadores e do próprio carbono do coque. O calor fornecido pelos queimadores possibilita o aporte de energia térmica para as reações que ocorrem no reator. Na base do reator, encontra-se o produto principal que é o ferro-gusa, cujo constituinte primário é o ferro (com cerca de 95% de teor mássico de ferro, o ferro primário), tendo como sobrenadante a escória, que contém as impurezas retiradas do minério de ferro da alimentação do Alto-forno (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022).

Figura 1 - Representação simplificada do processo de produção de ferro-gusa no Alto-forno



Fonte: adaptado de Rizzo (2009).

As matérias-primas, como concentrado de minério de ferro, coque de carvão mineral ou coque de carvão vegetal (ou equivalente) e fundente (calcário principalmente) são carregadas alternadamente através da correia transportadora para o topo do Alto Forno, enquanto o ar, enriquecido ou não de oxigênio, é insuflado pelas ventaneiras na parte inferior do Alto Forno.

Nesse processo, acontece a redução do minério concentrado de ferro por meio da redução química, ou seja, a separação de um metal de seu óxido, processado com o uso do agente redutor/combustível, que pode ser coque de carvão mineral ou coque carvão vegetal, ou a mistura dos dois (ou equivalente). Esse agente entra em combustão na região de insuflação de ar no interior do forno, gerando gases redutores em alta temperatura (RIZZO, 2009). O monóxido de carbono, dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio compõem o gás que sai pelo topo

do Alto Forno. Depois de misturado com gás de coqueria, esse composto gasoso é utilizado para pré-aquecer o ar insuflado no Alto Forno (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022).

O reator apresenta internamente regiões com diferentes perfis de temperaturas e de composição química, conforme as necessidades das condições termodinâmicas para produção de ferro primário (ferro-gusa). De acordo com Mourão (2007), as reações químicas das regiões ou zonas relacionadas diretamente à redução do minério, à produção de ferro-gusa e à produção de escória são definidas a seguir:

Na zona granular o minério e o coque mantêm a sua configuração em camadas alternadas com permeabilidade suficiente para a passagem dos gases redutores em contracorrente produzidos a partir dos queimadores (outra região do Alto Forno). Nesta zona, existem apenas duas fases (gases e sólidos) e ocorre a redução da hematita (Fe_2O_3) (equação 1) e da magnetita (Fe_3O_4) (equação 2) e a gaseificação do calcário dolomítico, como exemplificado nas equações químicas 1, 2 e 3 (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022; MOURÃO, 2007).



Já na zona de amolecimento/fusão/coesiva, a faixa de temperatura se encontra entre o início do amolecimento e a fusão da carga metálica. Nessa zona ocorre a reação de redução direta, que é altamente endotérmica, em contraste com a redução indireta da zona granular. Nessa zona se forma e funde a escória, redução final do FeO a Fe (ferro primário, ferro-gusa), conforme observado nas equações 4 e 5 (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022; MOURÃO, 2007).



A zona de gotejamento é dividida em duas subzonas: a região de coque ativo e a região denominada de “homem morto”, que consiste em uma camada de carbono sólido sobrenadante. Nessa zona os óxidos de impurezas são reduzidos e o ferro absorve o carbono, isto durante a

percolação através do leito de coque. Essa é a zona em que ocorre a formação da escória (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022; MOURÃO, 2007).

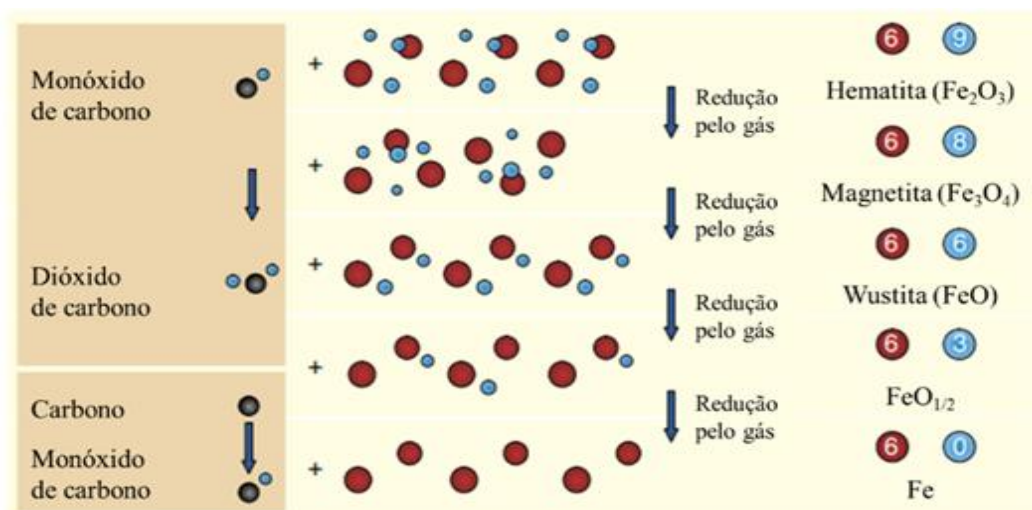
A zona de combustão corresponde a uma região gasosa de frente às ventaneiras. Nelas, à medida que as partículas de coque circulam, vão sendo queimadas, conforme a equação 6. Nesse processo ocorre a geração de gás redutor (no caso o que será consumido conforme equação 5) e energia na forma de calor (o carbono do coque é oxidado), e as reações incorporam os elementos de liga ao ferro-gusa (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022; MOURÃO, 2007).



As reações químicas que ocorrem no Alto Forno estão esquematicamente ilustradas na Figura 2, conforme Medeiros *et al.* (2007).

Pela Figura 2, obtém-se o ferro-gusa pela equação 5. O ferro-gusa, normalmente é utilizado no estado líquido, sendo conduzido por carro torpedo até a aciaria. Na aciaria o ferro-gusa é refinado (ele é purificado de suas impurezas e é adicionado nele elementos de liga) e transformado em aço. O ferro-gusa em sua composição química possui um teor mássico de carbono que varia entre 4% e 5%, sob forma de cementita (Fe_3C), e impurezas, tais como: o silício (de 0,3% a 2% em massa), o enxofre (0,01% a 1% em massa), o fósforo (de 0,05% a 2% em massa) e o manganês (de 0,5% a 2% em massa) (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022; MOURÃO, 2007; CHIAVERINI, 1982).

Figura 2 - Visão geral da redução de óxidos de ferro



Fonte: adaptado de Medeiros *et al.* (2007).

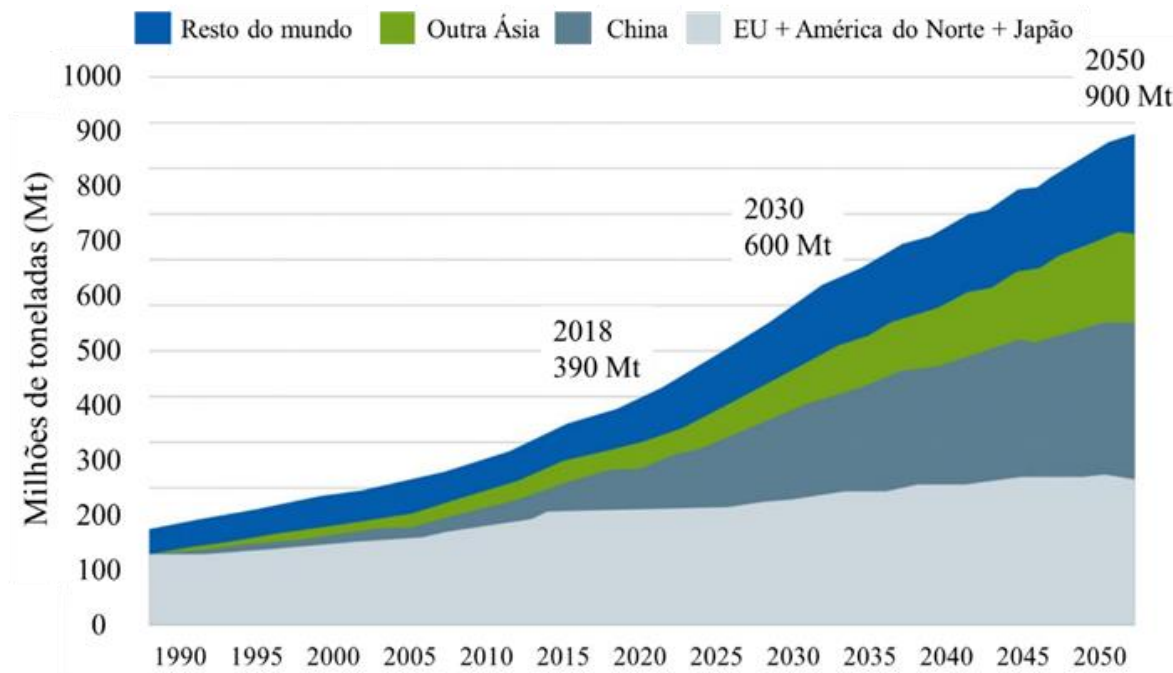
2.3 Sustentabilidade no setor siderúrgico

Segundo Muslemani *et al.* (2021), o setor siderúrgico global é o segundo maior setor industrial (atrás apenas do setor cimentício) em participação nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), tal fato é devido à sua forte dependência do consumo de combustíveis fósseis”, no processo produtivo como um todo.

Tendo em vista a alta demanda de produtos diversos de ferro nas próximas décadas, nasceu a necessidade da descarbonização das indústrias siderúrgicas. Segundo Fan e Friedmann (2021), o desafio da descarbonização envolve dois processos principais, são eles: a redução química para refino de minério de ferro (processo de emissão), comumente com coque; e da fonte de calor de alta temperatura necessária para operar o Alto Forno.

A Afirmação supracitada pode ter como base o “Plano Siderurgia” brasileiro de 2008 pretende, em parte, enfrentar o desafio da descarbonização, em um plano nacional baseado em três principais pilares, redução das emissões do setor; eliminar o processo de desmatamento de florestas nativas; e por final aumentar a competitividade de setor siderúrgico brasileiro (PINTO *et al.* 2018).

Dentro deste contexto, a indústria siderúrgica tem como característica o uso de sucatas de ferro e aço em processos semi-integrados, contudo, segundo Ciftci (2021), o emprego de produtos de ferro gusa (ou aço bruto) podem elevar a participação no uso de sucata de ferro provenientes de estruturas demolidas, carcaça de veículos e maquinários no fim de sua vida útil, na produção de aços em fornos elétricos. Isso pode contribuir na redução das emissões de gases de carbono na produção de aço. A Figura 3 apresenta a disponibilidade de sucata até 2050. A sucata desponta, assim, como uma das matérias-primas importantes do setor siderúrgico que pode contribuir para a redução das emissões da indústria e do consumo de recursos naturais. Ainda de acordo com Ciftci (2021), cada tonelada de sucata utilizada na produção de aço evita a emissão de 1,5 toneladas de CO₂, e o consumo de 1,4 tonelada de minério de ferro, 740 kg de carvão e 120 kg de calcário.

Figura 3 - Disponibilidade de sucata em fim de vida

Fonte: adaptado de Ciftci (2021).

O setor siderúrgico é profundamente relacionado às economias dos países, e espera-se que desempenhe um papel fundamental na transição de baixo carbono, fornecendo materiais de alta tecnologia, muitos fatores podem determinar como e em que direção os efeitos em toda a economia se materializam (BACHNER *et al.*, 2020).

Sabe-se que a contribuição de indústrias siderúrgicas é significativamente importante para a economia mundial, mas é altamente intensiva na emissão de gases de CO₂ e no consumo de energia, pois o uso de carvão mineral é a dominante na produção de ferro primário, tornando-se uma indústria potencial para com os problemas correlacionados com as mudanças climáticas (AVB, 2021).

A fim de mitigar e minimizar os possíveis danos ambientais, estas indústrias vem a anos buscando meios eficientes de reutilização e neutralização dos gases da siderurgia como, por exemplo, para o fornecimento de energia e calor, a implantação de sistemas de captura de carbono e a utilização de energia renovável. O incremento dos processos supracitados e o desenvolvimento de novas ideias são considerados ponto chave para a transição da indústria siderúrgica para a neutralidade de carbono (ZHANG *et al.*, 2021).

Segundo Zhao *et al.* (2019), uma economia voltada para o baixo carbono, ou para a neutralidade de carbono, baseia-se em um modelo de desenvolvimento econômico de baixa

poluição, de baixas emissões e de baixo consumo de energia. Logo, essa economia simboliza uma mudança necessária na produção atual no consumo de combustíveis fósseis, bem como na grande quantidade de emissões de gases de carbono.

Dentro dessa temática os produtos, resíduos e os coprodutos sólidos de usinas siderúrgicas vêm sendo empregados com a finalidade de agregar valores sustentáveis e econômicos, é o caso do Vietnã, onde a escória de aço vem sendo estudada para aplicação em diversos tipos de construções, inclusive em edificações e pavimentos. Os resultados do experimento indicam que a escória de aço, em substituição à areia, pode manter a qualidade do concreto tradicional, pois a composição da escória contém muitos componentes de cimento (NGUYEN; LE; NGUYEN, 2018).

De acordo com Zhang *et al.* (2021), o objetivo da neutralidade de carbono exige uma evolução em todas as áreas e em todo o processo de produção e consumo de energia, afetando diretamente os métodos de produção. As maneiras principais de obter uma redução do dióxido de carbono é reduzindo o consumo total de energia, especialmente energia fóssil, utilização da energia não fóssil para substituição do mineral e aumentar os sumidouros de carbono por meio do plantio de árvores.

Tecnologias de produção adicionais podem ser implementadas para reduzir os efeitos da combustão de combustíveis fósseis, tais como as tecnologias de emissão negativa. Segundo Mandova *et al.* (2019), o papel principal das tecnologias de emissão negativa é, basicamente, capturar e armazenar os GEE por meio de o reflorestamento, da bioenergia gerada a partir de CO₂ capturado e a captura direta do CO₂ atmosférico, dentre outros. O uso máximo de produtos à base de biomassa resulta em uma vantajosa redução nas emissões de gases de carbono pelas tecnologias de produção de aço existentes (NWACHUKWU; WANG; WETTERLUND, 2021).

2.4 A economia circular, sustentabilidade

A conceituação da economia circular parte do princípio de que se trata de um novo paradigma a ser perseguido e conquistado, em razão da urgência da pauta ambiental, da possibilidade de exaustão dos recursos naturais, da aglomeração crescente de resíduos sólidos e, ainda, a circularidade do uso das matérias-primas com vistas para o combate ao desperdício do seu potencial em si. “*Reutilizar, Reduzir e Reciclar*”, conhecida também como “3R”, ilustra bem o conceito, fazer uso de materiais e matérias-primas que já foram utilizadas em um ou mais ciclos de produção, esta perspectiva deu origem ao termo em inglês *Brownfield*, em **Universidade Federal de Minas Gerais / CEPEAD / Curso de Especialização em Gestão Estratégica**
Artigo aprovado pela banca em 27/02/2023.

português, “campo marrom” - em livre tradução, ou seja, não se trata de extração de matéria prima *in natura*, mas, sim do reaproveitamento de outros processos pelos quais esses materiais já passaram (TEIXEIRA *et al.*, 2022; AZEVEDO, 2015; LEITÃO, 2015).

Com a alternativa do emprego da economia circular, finda-se a dependência, ou pelo menos a exclusividade, de “*Extract, Produce, Consume and Discard*”, que é o conceito da Economia Linear atual (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021; AZEVEDO, 2015). Na economia linear se tem a extração de matérias-primas dos chamados “campos verdes” ou em inglês *Greenfields*, conceito dado a extração de recursos *in natura* para a produção, e, depois de consumidos descartados, produz um “desgaste prematuro” do potencial dos materiais e gerando os chamados passivos ambientais, os conceitos a este respeito serão abordados mais adiante, apresenta-se primeiro a origem da conceituação formal, os papéis do Estado, da sociedade e das empresas na economia circular (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

Segundo Su *et al.* (2013), o conceito de Economia Circular foi levantado por dois economistas ambientais britânicos, Pearce e Turner (1990), na publicação ‘Economia de Recursos Naturais e Meio Ambiente’, Pearce e Turner assinalaram que uma economia aberta tradicional era desenvolvida sem nenhum objetivo com a reciclagem e que tratava o meio ambiente como um reservatório de resíduos.

No entanto, sob a primeira lei da termodinâmica, em que a energia total e a matéria permanecem constantes em um sistema fechado, o sistema aberto pode e deve ser convertido em um sistema circular ao considerar a relação entre o uso dos recursos e dos resíduos residuais. Em outras palavras, com os problemas ambientais existentes e a escassez de recursos, os autores sugeriram a necessidade de contemplar a terra como um sistema econômico fechado: aquele em que a economia e o meio ambiente não são relacionados por interligações lineares, mas por uma relação circular.

Por intermédio de uma análise sobre a relação entre os sistemas econômico e natural, propuseram um circuito fechado de fluxos de materiais na economia, que foi denominado “economia circular” (AZEVEDO, 2015).

A Economia circular está definitivamente em destaque no mundo pelos motivos já citados acima, para além da importante conscientização que está se formando entre as novas gerações e por parte de algumas empresas. A implementação formal depende muito da participação governamental, participação compulsória, com papel relevante no que diz respeito

às políticas públicas, legislação e investimento, tomando para si o papel de indutor dessa nova ferramenta indispensável à sustentabilidade da produção e da vida em sociedade.

Portanto, dentro da contextualização da economia circular, cabe ao Estado liderar e implementar o arranjo produtivo que contemple as bases para esta nova fase da economia que é dever e direito de todos. Ao se valer de suas prerrogativas de implementação do cenário, abre o caminho para que a iniciativa privada idealize e promova novos negócios, empresas já com a mentalidade da economia circular em sua razão de existir, gerando emprego e renda e dando sua contribuição para que os recursos sejam utilizados de forma sustentável econômica e ambientalmente (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

A Europa lidera um movimento de grande importância acerca da Economia Circular, implementando legislação específica e coordenada, já existem incentivos fiscais e econômicos destinados a esta nova fase da economia, parte desde o reconhecimento do trabalho das empresas, com certificações que dão destaque a atuação de modelos de negócio baseados nos conceitos da EC, bem como a criação de parcerias pelo mundo, ou seja, onde quer que haja iniciativa ancorada nos conceitos de repensar, reutilizar e reciclar, pode se tornar um parceiro de empresas europeias, ou mesmo lançarem mão de um mercado que leva em consideração os negócios sustentáveis e estão dispostos a pagar mais pelos seus produtos em razão de seu valor ambiental (TEIXEIRA *et al.*, 2022, DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

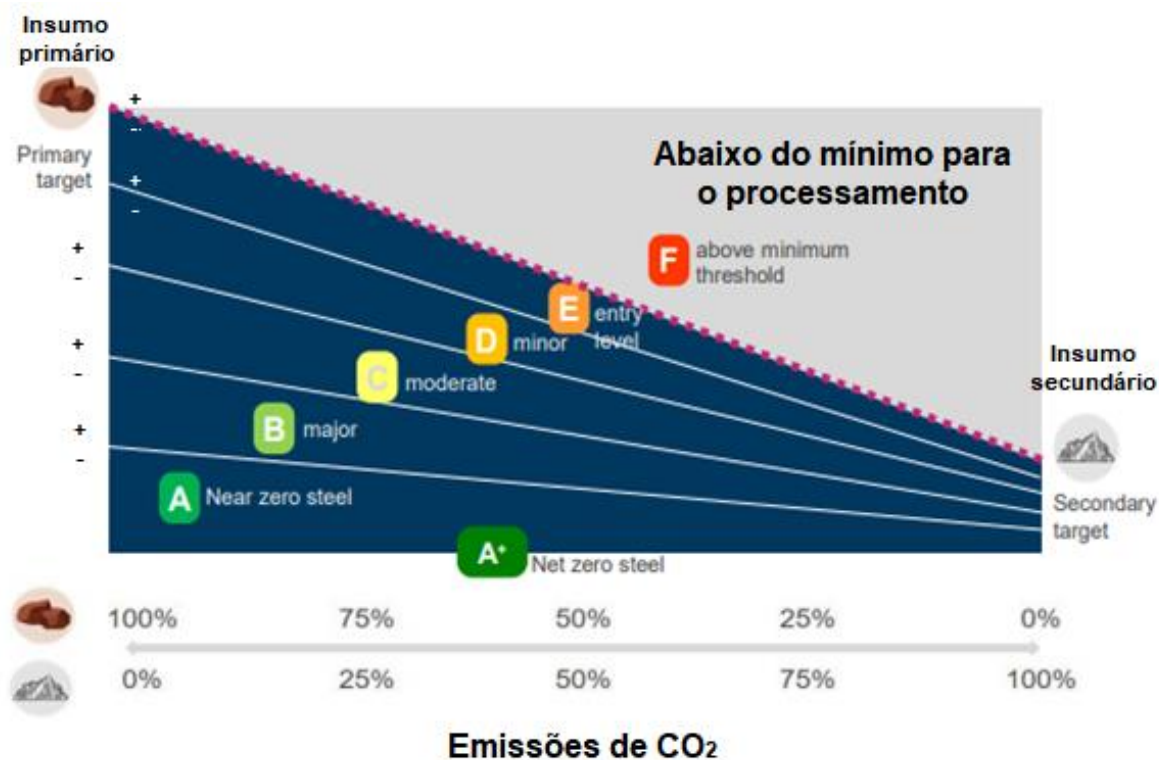
No Brasil, já existe legislação específica, é a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010), organiza a forma com que o país lida com o lixo, exigindo dos setores públicos e privados transparência no gerenciamento de seus resíduos. É um passo importante, mas, ainda não é um arranjo produtivo, nesse quesito o país ainda precisa avançar muito, a abundância de recursos naturais tem seus limites, como já visto em outras regiões pelo mundo, entrar de vez nos conceitos da economia circular é cada vez mais inadiável.

As iniciativas no país, ainda estão isoladas por setor de atuação, necessita de se promover a integração até que o conceito se torne intrínseco ao próprio consumo e na sociedade como um todo.

O *case* da Empresa Arcelor Mittal (ARCELOR MITTAL, 2023) é um exemplo de iniciativas de projetos de creditação de sustentabilidade no setor siderúrgico. Ele se apropria do conceito de avaliar, certificar e validar perante o consumidor uma ação integrada que visa uma produção do aço com a meta de zerar as emissões de carbono, quaisquer que sejam as formas de produção. É um conceito de padrão global para a produção de aço de baixo carbono

até alcançar carbono zero. Não há ainda no mundo este padrão, mas, esta é a busca da empresa, é o desafio ao qual eles se propuseram, começando pela percepção detectada num consumidor que está cada vez mais exigindo estes esforços por parte das empresas, criando-se um mercado onde a não transparência, ou ainda a não adequação aos novos padrões aceitáveis do ponto de vista ambiental, sejam penalizados, e por outro lado, as empresas que implementarem tais padrões, terão acesso a um nível de valor agregado que incentiva e valoriza seus esforços.

Figura 4. Sistema de pontuação proposto para avaliar as emissões no processo produtivo:



Fonte: adaptado de WORLD STEEL ASSOCIATION (2022)

O Conceito do padrão de aço de baixa emissão de carbono (Figura 4) é baseado em três princípios fundamentais (ARCELLOR MITTAL, 2022; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022):

- Dupla pontuação, uma que premia o ciclo de vida dos produtos acabados, e outra que premia as empresas produtoras à medida em que descarbonizam seus processos;

- Os incentivos à descarbonização, devem contemplar todos os ganhos oriundos de novas tecnologias de produção, e não somente no maior consumo de sucata com tecnologias já existentes;

- Incluir um limite claramente definido, a partir do qual as emissões de carbono, são contadas para o sistema de avaliação de descarbonização. A posição de um produtor de aço mostrada na Figura 4 seria baseada na incorporação de emissões por tonelada de aço laminado a quente produzida, e o insumo metálico que utilizam.

O produtor de aço que estiver no limite ou abaixo dele, desceria seis degraus na escala, de “A +” para “E –“ (Figura 4), ao contrário, o avanço na escala se dará, à medida em que o produtor descarboniza, incorporando os percentuais de CO₂, e, portanto, com emissões abaixo do limite, definindo desse modo o aço quase zero levando-se em conta todas as rotas e tecnologias utilizadas para a descarbonização.

A proposta de selo de certificação de emissões (ARCELLOR MITTAL, 2023; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022) é apresentada na Figura 5. Segundo a Figura 5, propõe-se:

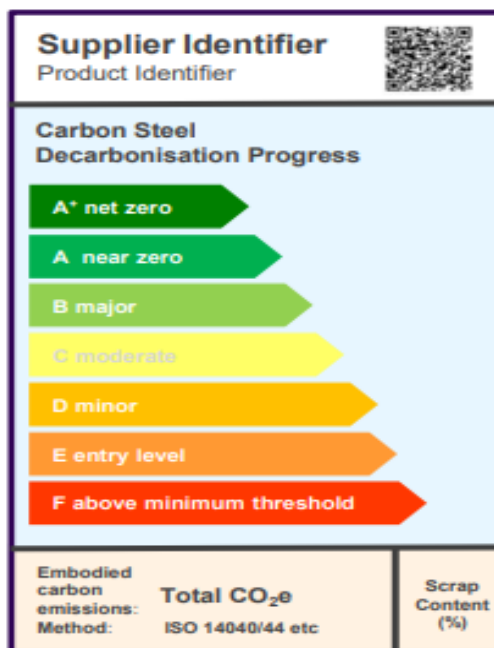
- Propõe um sistema transparente e de fácil identificação que mede o progresso da descarbonização independente da rota siderúrgica;

- Que seja de fácil utilização por parte das autoridades, identificando a produção com baixas emissões, criando mercados que recompensem, e acelerando o processo de adoção das práticas por parte das empresas;

- Cujas base mássica seja 1 (uma) tonelada de produto laminado a quente associado a produção física de aço, independente da tecnologia.

Com isto o selo apresentado na Figura 5, propõe ao público geral ter uma identificação rápida e visual o quanto a empresa está em seu nível de emissões de gases CO₂. Com o sistema de pontuação obtido da Figura 5, espera-se incentivar a sustentabilidade pela recompensa os produtores de aço para que as empresas possam alcançar classificações mais altas, reduzindo estruturalmente as emissões com investimentos em novas tecnologias, é imprescindível para alcançar-se a meta. (ARCELLOR MITTAL, 2022; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022).

Figura 5. Selo de certificação das emissões.



Fonte: WORLD STEEL ASSOCIATION (2022)

O Tripé da sustentabilidade se alinha com o projeto da Arcelor Mittal (2023) ao possibilitar abordar inovação, desenvolvimento e sustentabilidade nas três dimensões, a econômica, a social e a ambiental, que são os pilares que sustentam os conceitos de sustentabilidade e de desenvolvimento sustentável (TEIXEIRA *et al.*, 2023; CONCEIÇÃO *et al.*, 2022; KHAN; AHMAD; MAJAVA, 2021). Contudo, os critérios práticos propostos pela Arcelor Mittal (2023) abordam mais o aspecto produtivo e a questão ambiental. Pela prática do projeto pelas empresas se otimiza a produção, minimizando-se os efeitos danosos de diversos tipos de resíduos industriais, e o consumo energético, conforme observado por Conceição *et al.* (2022) para os projetos que tocam o tripé da sustentabilidade. Entretanto o projeto da Arcelor Mittal (2023) não aborda com profundidade a questões sociais e aspectos econômicos de desenvolvimento oriundos da creditação proposta de carbono zero.

2.5 Ativo e passivo ambiental

O conceito de Ativo ambiental, segundo Ribeiro *et al.* (2017, p. 7), “os ativos ambientais são bens adquiridos pelas empresas para controlar, preservar e recuperar o meio ambiente. (...) as características dos ativos ambientais são diferentes de empresa para empresa, pois os processos produtivos e os bens utilizados no processo, controle, conservação e preservação do meio ambiente variam conforme a empresa. Portanto, cada vez mais são realizados esforços no sentido de proteger o meio ambiente, reduzindo e prevenindo os efeitos da poluição”. Também são classificados como ativos ambientais os investimentos em instalações, máquinas, equipamentos, dentre outros. Adquiridos com o intento de minimizar os impactos causados pela degradação ambiental, os gastos com pesquisas que tenham a mesma finalidade deverão receber a mesma classificação. Entre os benefícios que esses gastos poderão trazer para a entidade, os mais prováveis são: a melhoria da eficiência; o aumento da capacidade; a segurança de outros ativos; a redução ou a eliminação de contaminação resultante de operação em exercícios futuros, entre outros. (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

Já o termo “passivo ambiental”, causa muitas discussões por estar frequentemente ligado a multas, penalidades ou violações a leis ambientais. É muito comum a associação entre custos e o cumprimento das regulamentações (RIBEIRO *et al.*, 2017, p. 8). Apesar de ser um termo abrangente, pode-se definir passivo ambiental como uma obrigação adquirida em decorrência de transações anteriores ou presentes, que provocaram ou provocam danos ao meio ambiente ou a terceiros, de forma voluntária ou involuntária, os quais deverão ser indenizados através da entrega de benefícios econômicos ou prestação de serviços em um momento futuro (GALDINO *et al.*, 2002).

3. Procedimentos metodológicos

Este estudo de caso de uma produtora de briquetes metalizados descreve, em parte, o posicionamento atual das siderurgias sobre a destinação dos resíduos sólidos gerados por suas operações, especificamente os pós e as lamas de aciaria, conhecidos aqui como coprodutos (PAM, 2023). Aborda-se, também, nesse estudo, um pouco sobre o cenário brasileiro e internacional quanto a Economia Circular (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

O estudo de caso é sobre os briquetes metalizados produzido pela empresa Produtos Ambientais Metalúrgicos Ltda (PAM). A PAM (2023) é localizada no polo industrial de São

Joaquim de Bicas, estado de Minas Gerais. Ela possui cerca de 25 anos na produção de soluções para o setor siderúrgico e expertise na fabricação dos briquetes metalizados, que desponta como resposta tecnológica à destinação dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias siderúrgicas.

A produção de briquetes metalizados, segundo a empresa, apresenta vantagens econômicas e se incorpora dentro das iniciativas sustentáveis. De forma complementar, apresenta-se outra iniciativa associada a empresa ArcelorMittal (2023), que difundiu a sustentabilidade nos insumos de produção de ferro-gusa. O objetivo da empresa é alcançar a descarbonização do processo de produção do aço, utilizando para tanto novas tecnologias de reaproveitamento dos rejeitos sólidos (dentre outros) dos processos produtivos, além da diminuição do consumo de carvão vegetal (e mineral) e de energia como um todo.

De uma forma resumida, tem-se que o projeto da Arcelor Mittal (2023) prevê o uso de uma escala para medir o avanço da empresa (no caso aqui do grupo industrial) em direção da condição de zero emissão de gás carbônico. A escala apresenta um sistema de fácil utilização por parte das autoridades internas e externas à empresa para a avaliação. Esta pontuação concede uma certificação das empresas participantes para que possam ser mais bem remuneradas pelo aço sustentável por elas produzido.

A escolha do método mais adequado para desenvolvimento de uma pesquisa está diretamente ligada ao objetivo e, conseqüentemente, das questões que o pesquisador quer responder. Conforme Gil (1994), pode-se classificar a pesquisa quanto ao objetivo em três categorias básicas: exploratória, explicativa e descritiva. As pesquisas exploratórias visam compreender um fenômeno ainda pouco estudado ou aspectos específicos de uma teoria ampla. As pesquisas explicativas identificam os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, explicando suas causas. E, finalmente, as pesquisas descritivas descrevem determinada população ou fenômeno.

A metodologia empregada para o presente estudo de caso é do tipo descritivo de um estudo de caso, uma vez que, o trabalho avalia as vantagens econômicas e ambientais de uma empresa que produz briquetes ricos em ferro para uso em Alto Forno na forma de uma entrevista em profundidade. Para a descrição da *expertise*, escolheu-se uma empresa nacional de transformação de resíduos sólidos, que já produz briquetes ricos em ferro para Alto Forno, atendendo o setor siderúrgico.

O estudo de caso é um método de pesquisa que utiliza, geralmente, dados qualitativos ou quantitativos, coletados a partir de eventos reais, com o objetivo de explicar, explorar ou

descrever fenômenos atuais inseridos em seu próprio contexto. Caracteriza-se por ser um estudo detalhado de poucos, ou mesmo de um único objeto, fornecendo conhecimentos aprofundados (YIN, 2009).

A técnica qualitativa de entrevista em profundidade constitui um complemento da metodologia aplicada neste artigo. A entrevista foi proposta no formato individual semiaberto e com questões semiestruturadas. Ela objetiva explorar um assunto específico, conforme Teixeira *et al.* (2021), sobre “economia circular e sustentabilidade”. A entrevista em profundidade foi realizada com duas pessoas associadas diretamente a alta administração da empresa PAM.

Na entrevista buscou-se informações, percepções e experiências das pessoas por um dos acionistas e pelo diretor de operações da empresa PAM. Eles foram selecionados para entrevista por estarem intimamente ligados ao conceito, desenvolvimento, fabricação e distribuição dos briquetes metalizados para o setor siderúrgico. Na entrevista em profundidade, seguiu-se um roteiro de oito (8) questões. Delas buscou-se obter a intensidade nas respostas de cada profissional sobre o assunto, sem buscar a quantificação ou representação estatística para analisá-las e apresentá-las de forma estruturada, conforme Soares, Diehl e Vilver (2016).

4. Resultados e discussão

4.1 Entrevista

Utilizando-se da ferramenta entrevista, procurou-se entender desde a fabricação dos briquetes metalizados, sua utilização nos Altos-fornos e suas contribuições, foram selecionados dois representantes da empresa PAM o primeiro é o Sr. Marcelo Belisário, Engenheiro e Diretor de Operações na empresa PAM, o segundo entrevistado foi o Sr. Marcus Brandão, Engenheiro da empresa.

Questão 1: Como se dá o processamento de briquetes metalizados?

Entrevistado: Marcelo Belisário - Diretor de Operações.

Resposta:

“A produção de briquetes metalizados se inicia pela aglomeração de finos e lamas de minério. Esses são misturados em proporções adequadas visando se ter uma uniformidade final no teor de minério, conforme a demanda solicitada pelos clientes à PAM. A mistura é então compactada para dimensão adequada a ser introduzida e utilizada no Alto-forno siderúrgico, respeitando-se para tanto os teores de ferro e fósforo úteis no processamento para a produção do ferro-gusa.

O processo de aglomeração dos finos se inicia com o recebimento das matérias-primas, sendo em seguida realizada a sua classificação útil e a gestão dos materiais. A etapa seguinte à aglomeração dos finos, é a mistura para a formação dos blends, secagem. Na aglomeração, adicionam-se aos finos os agentes ligantes e, logo após, a conformação por prensagem por rolos. O material conformado sofre a secagem e, por fim, a cura. Após a cura se tem o produto briquetado que está em condições para ser transportado e carregado para o Alto-forno siderúrgico”.

Na resposta dada à questão 1, tem-se a descrição do processo de briquetagem desde o recebimento dos rejeitos à produção dos briquetes, esses prontos para o mercado consumidor.

Questão 2: Quais são as matérias-primas dos briquetes?

Entrevistado: Marcelo Belisário - Diretor de Operações.

Resposta:

“Finos e lamas de minério, entre outros”.

Na resposta dada à questão 2, o entrevistado destaca o diferencial dos briquetes a partir de suas principais matérias-primas, as lamas e finos de minério.

Questão 3: Quais são os agentes ligantes na produção dos briquetes?

Entrevistado: Marcelo Belisário - Diretor de Operações.

Resposta:

“Os principais agentes ligantes presentes no mercado são: amido de milho, a cal, derivados de sódio, entre outros”

A resposta dada à questão 3, tem-se a informação da composição adicional aos briquetes, além dos finos de minério, para que este fique consolidado dimensionalmente para ser recebido nos Alto Fornos.

Questão 4: Qual é o impacto na produção de ferro-gusa?

Entrevistado: Marcelo Belisário - Diretor de Operações.

Resposta:

“Atualmente o briquete metálico está limitado a uma participação nos micro-fornos na ordem de 20% de sua carga mássica total. Os grandes parques siderúrgicos, as grandes aciarias com Altos-fornos de muito maior dimensão e capacidade produtiva ainda não utilizam o briquete metálico, isso demonstra um enorme potencial para este produto, que ainda pode e deve alcançar tais indústrias em razão da grande contribuição que pode proporcionar a esta cadeia produtiva, economia direta, mais eficiência técnica e indubitavelmente a contribuição ambiental”

Na resposta dada à questão 4, tem-se informações do principal reator que recebe os briquetes, os denominados micro-fornos, bem como o teor percentual mássico para alimentação desse reator, 20% em massa.

Questão 5: Como se caracterizam os briquetes metalizados?

Entrevistado: Marcus Brandão - Engenheiro.

Resposta:

“O briquete metalizado é o resultado da aglomeração de finos e lamas de minério em geral, que são sua matéria prima principal. A reutilização, a reciclagem daquilo que antes era um transtorno logístico e um passivo ambiental num produto acabado, é sem dúvida sua característica mais nobre, a mais importante, a resultante é a geração de valor agregado, transformado em um negócio que por sua vez gera emprego e renda. O produto final será novamente utilizado no Alto-forno.”

Na resposta dada à questão 5 destaque-se o papel circular que o processo de briquetagem promove, bem como benefícios como a geração de valor agregado.

Questão 6: Qual é a relação custo x benefício dos briquetes metalizados como carga de Alto-forno?

Entrevistado: Marcus Brandão - Engenheiro.

Resposta:

“Uma vez que a matéria-prima utilizada para a produção do briquete metalizado são as lamas e os finos de minério, o primeiro ganho é que o processo de redução do óxido para a concentração do ferro já ocorreu, desta forma o ferro metálico já está presente com teor aproximado variando entre 58% e 64%, ou seja, o consumo de energia para sua incorporação após o carregamento no Alto Forno é significativamente menor. O briquete metalizado é um produto homogêneo com ótima concentração de ferro metálico, e é ótima também sua aceitação pelo Alto Forno em razão destas características já mencionadas, corresponde a uma sucata em termos de aproveitamento, entretanto, com custo de aquisição menor. Verificou-se também aumento na produção do ferro-gusa, com o briquete ocupando o mesmo espaço físico que o minério de ferro. E, por fim, um ganho absolutamente significativo é o aproveitamento das lamas e finos de minério como matéria prima, algo que era um transtorno logístico e principalmente um passivo ambiental, torna-se um produto acabado e útil novamente. Sem dúvida a produção do briquete metalizado, atende claramente ao conceito da economia circular, que reúne globalmente os melhores esforços, a fim de ser a resposta e a contribuição da indústria pesada para a diminuição de CO₂ na atmosfera e diminuição considerável do consumo de energia.”

A resposta dada à questão 6 reforça a resposta dada à questão 5 no destaque ao papel de economia circular que o processo de briquetagem promove, bem como benefícios para as empresas consumidoras de briquetes, tais como a diminuição de emissão de CO₂ na atmosfera e do consumo de energia no processo produtivo dessas empresas.

**Questão 7: Há diminuição do consumo de coque nas cargas do Alto-forno?
Quanto?**

Entrevistado: Marcus Brandão - Engenheiro.

Resposta:

“Sim, o uso do briquete metalizado no Alto-forno possibilita a redução do uso de carvão vegetal, o número exato ainda não está oficialmente tabulado, entretanto, temos o depoimento de um dos nossos clientes, que aqui chamaremos de Alpha, por questões de ética, que realizou a conta em testes empíricos e chegou à conclusão que o uso do briquete metálico, produzido pela PAM, na carga do seu Alto Forno, reduziu em 10% o uso de coque, com essa economia obtida, a empresa aferiu que o briquete comprado por eles saiu de graça no processo, ou seja, mais ferro-gusa com menor custo.

A resposta dada à questão 7 exemplifica a resposta dada à questão 6, dando destaque aos benefícios para as empresas consumidoras de briquetes, tal como a ferro-gusa com menor custo pela redução de consumo de coque (carvão), dados dos testes podem ser observados na Tabela 1, disponível no item 4.2, do presente trabalho. Valor gerado pelo uso do briquete na produção de ferro gusa.

Questão 8: Existem incentivos governamentais para exercício desta atividade econômica?

Entrevistado: Marcus Brandão - Engenheiro.

Resposta:

“Sim, porém, ainda restritos à lei de resíduos sólidos - Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010., que é uma legislação bastante recente, faz-se necessário a implantação e desenvolvimento de um arranjo produtivo específico.

A resposta dada à questão 8 ou final menciona a Lei Brasileira 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) como restritora das ações de incentivos à produção de briquete.

4.2 Valor gerado pelo briquete na produção de ferro-gusa

Os benefícios no emprego de briquetes metalizados na cadeia de produção do ferro-gusa têm como destaques: o econômico, porque o briquete combina alto teor de ferro e baixo teor de fósforo (como insumo de carga de ferro para o Alto Forno); e o ambiental, em razão do ganho proporcionado pela aglomeração de resíduos sólidos, gerados pelas próprias siderúrgicas, e que estão acumulando passivo, como visto anteriormente.

Ao obter-se um material mais homogêneo resultante do processo de briquetagem, melhoram-se os insumos do Alto-forno, ou matérias-primas de carregamento, que irão proporcionar excelente desempenho produtivo com uma ocupação espacial mais eficiente no Alto Forno. Essas melhorias acarretam a redução no consumo do carvão vegetal por carga metálica, que por sua vez representa economia financeira, pois, o briquete metálico custa três vezes menos.

A diminuição das emissões de CO₂, utilizando-se o briquete no processo de redução da carga metálica em Altos Fornos, possibilita o menor consumo de carvão no processo, no contexto geral a Tabela 1 mostra um consumo menor de carbono utilizando como fonte de ferro

para o Alto Forno com o uso dos briquetes. Essa economia possibilita um retorno de cerca de R\$450,00 por tonelada de ferro-gusa produzido no Alto Forno.

Ainda pela Tabela 1, destaca-se que a utilização de briquetes metalizados em Alto Fornos possuem também potencial de:

- 1) Diminuição do Consumo Específico de Carvão Vegetal, economia de até 45%, que é o principal custo na produção de Ferro Gusa;
- 2) Melhoria do Índice de Produtividade (Produção diária / volume útil do Alto Forno) devido a menor utilização do carvão vegetal, material de baixa densidade a granel, consequentemente maior utilização útil do volume do Alto Forno (ocupação espacial eficiente do Alto Forno) reduzindo custos fixos das Siderúrgicas.

Tabela 1. principais números relativos aos ganhos com uso do briquete metálico.

Item	Fonte Fe*	Consumo Fonte Fe (t)	Gusa Produzido (t)	Consumo Carvão Vegetal (t)	Valor gasto com Carvão Vegetal	Volume Carvão Vegetal (m ³)
1	Minérios Concentrados (pelotas e sinter)	1,82	1	0,53	R\$ 1.008,00	2,24
2	Briquetes Metalizados	1,82	1	0,31	R\$ 558,00	1,24
3	Diferença (2) - (1) =	0	0	-0,25	-R\$ 450,00	-1

** Minérios e Briquetes metalizados equalizados com teor de Fe de 56% total;*

**Carvão Vegetal = R \$1.800,00 / ton. - Referência Julho de 2022;*

**Densidade a granel do Carvão Vegetal = 250 kg/mdc*

Fonte: Dados fornecidos ao autor pela PAM (2022)

Outros benefícios específicos resultantes do emprego de briquetes como fonte de ferro no Alto Forno são:

- Economia em reflorestamento para compensar carvão vegetal consumido;
- Redução do consumo de Ar e Energia Elétrica;

- Aproveitamento do CaO, MgO e baixo SiO₂ presentes no briquete favorecem o balanço de carga do Alto-Forno e redução da quantidade de calcário enfundada;
- Aumento da vida do revestimento do forno.

Na Tabela 2, apresenta-se a composição química do briquete, onde se destaca o seu alto teor de ferro (superior a 60% de teor em massa) o que possibilita seu uso em Alto Forno para produção de ferro-gusa.

Tabela 2. Ficha técnica de teor mássico do briquete metálico.

Fe Total	Fe Met.	P	CaO	SiO₂	Finos
≥ 60% ¹	≥ 22%	≤ 0,10%	≤ 11%	≤ 6%	≤ 12%

Fonte: Dados fornecidos ao autor pela PAM (2022)

4.3 Os briquetes e o seu contexto na economia circular

Importa salientar que o briquete metalizado é a resposta adequada para a ArcelorMittal, quando aponta para o uso de novas tecnologias para a introdução de matérias primas no Alto-forno, pois o uso destes briquetes permite além de reduzir das emissões de gás carbônico e monóxido de carbono, para além de somente aumentar o consumo de sucata com tecnologias já existentes.

A dinâmica da indústria siderúrgica, assim como de diversos outros setores industriais, tem sido diretamente afetada por fatores econômicos e socioambientais, os quais representam um grande desafio para o setor. De que forma então, inserem-se nesse contexto os briquetes metalizados? A matéria-prima dos briquetes as lamas e finos de aciaria ricos em minério de ferro, rejeitos sólidos de processos siderúrgicos. Nesse caso, já houve transformação dessas matérias-primas, cumprindo um papel na economia linear e, portanto, passariam a ser passivos ambientais que possivelmente serão depositados em barragens de rejeitos etc.

Pelo processo de briquetagem o rejeito é transformado em um novo produto que, por sua vez, retorna às siderúrgicas na alimentação do Alto Forno. Nesse caso, o briquete cumpre

integralmente o conceito de “Reutilizar, Reduzir e Reciclar” (LEITÃO, 2015). Ele na sua origem é, portanto, um *brownfield*, material em estado de reutilização, de reaproveitamento. Destaque-se, assim, o papel da briquetagem que permite o consumo dos rejeitos (matérias-primas do briquete) ao seu potencial máximo, aproveitando todos os componentes integralmente.

5. Considerações finais

A escolha pela utilização dos briquetes metalizados na cadeia de produção do ferro-gusa é inovador no mercado brasileiro e apresenta um grande potencial para o crescimento no setor metalúrgico e siderúrgico. O uso de briquetes na siderurgia responde fielmente à proposta de aplicações de novas tecnologias que diminuam as emissões de carbono na produção do aço, proposta essa levantada por uma das maiores produtoras de aço no mundo, a ArcelorMittal. Com o uso desses briquetes metalizados alimentando o Alto Forno torna-se possível uma produção mais sustentável, que é um diferencial competitivo e creditável, pois contribuem para redução dos custos diretos em razão da redução do consumo de carvão vegetal (que é muito mais caro que o briquete), atuando também e dessa forma, diretamente na redução de emissão de CO_2 e trazendo uma menor dependência de materiais oriundos de reflorestamento.

A legislação de incentivos à produção de briquetes metalizados (briquetagem) está restrita à lei de resíduos sólidos brasileira, o que limita maiores investimentos no setor produtivo e, de certa forma, a sua divulgação como insumo de concentrado de ferro para o Alto Forno de ferro-gusa. Contudo, destaca-se no processo de briquetagem a destinação responsável de resíduos sólidos, como a lama de aciaria, finos de minério e outros. Essa destinação responsável gera valor econômico e é sustentável. Ela carrega consigo a perspectiva de alçar os briquetes metalizados num lugar de destaque na cadeia produtiva do ferro-gusa.

Para continuidade deste trabalho sugerem-se investigações quantitativas a respeito do processo de briquetagem, num grupo mais abrangente de empresas consumidoras no Brasil. Nessas novas investigações se poderá coletar mais dados técnicos para consolidar os benefícios diretos e indiretos que o emprego de briquetes como carga do Alto Forno podem alcançar no setor siderúrgico.

Referências

AZEVEDO, Juliana Laboissière. A Economia Circular Aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. **In: XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 2015.** http://www.inovarse.org/sites/default/files/T_15_036M.pdf

ARCELLOR MITTAL. Sustentabilidade. A base da gestão dos negócios da ArcelorMittal Brasil é a sustentabilidade, 2023. <https://brasil.arcelormittal.com/sustentabilidade>

AVB. Aço Verde Brasil. Sustentabilidade. 2021. <https://avb.com.br/sustentabilidade>

BACHNER, G.; MAYER, J.; STEININGER, K.W.; ANGER-KRAAVI, A.; SMITH, A.; BARKER, T. S. Uncertainties in macroeconomic assessments of low-carbon transition pathways - The case of the European iron and steel industry. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 172, p. 106631, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106631>.

BARBOSA, Mariana Oliveira; SILVA, Priscilla Chantal Duarte; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. Aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, p. e022018-e022018, 2022. <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/720>

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm. Acesso em: 20 mai. 2022.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo. Associação Brasileira de Metais: São Paulo, 1982. <https://pt.scribd.com/document/386765900/CHIAVERINI-Vicente-Acos-e-ferros-fundidos-4-ed-1979-Associação-Brasileira-de-Metais-pdf>

CIFTCI, Baris Bekir. **Fact sheet: steel and raw materials**. 2021. Worldsteel Association. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:16ad9bcd-dbf5-449f-b42c-b220952767bf/fact%2520sheet%2520raw%2520materials%25202021.pdf>

CONCEIÇÃO, Isabella Carolina *et al.* Os discursos sobre a indústria 4.0 no setor de estampagem da indústria automobilística: uma revisão sistemática da literatura. **Revista de Casos e Consultoria**, v. 13, n. 1, 2022. <https://periodicos.ufrn.br/casoseconsultoria/article/view/27861>

CUNHA, Adriano Ferreira da *et al.* Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, p. 111-116, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672006000100014>

DE OLIVEIRA, Sabrina Julian *et al.* Logística reversa: a destinação acertada de baterias de smartphones no Brasil. **Revista de Casos e Consultoria**, v. 12, n. 1, p. e26337-e26337, 2021. <https://periodicos.ufrn.br/casoseconsultoria/article/view/26337>

FAN, Zhiyuan; FRIEDMANN, S. Julio. **Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy**. *Joule*, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 829-862, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.

GALDINO, Carlos Alberto Bezerra *et al.* Passivo ambiental: revisão teórica de custos na indústria do petróleo. **Production**, v. 14, p. 54-63, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132004000100006>

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora ATLAS, 1994.

IBS. INSTITUTO AÇO BRASIL, Relatório Anual de Sustentabilidade no Setor Siderúrgico, 2020, <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/>

KHAN, I. S.; AHMAD, M. O.; MAJAVA, J. Industry 4.0 and sustainable development: a systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives, *Journal of cleaner production*, v.297, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>

LEITÃO, Alexandra. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. *Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting*, v. 1, n. 2, p. 149-171, 2015. <https://repositorio.ucp.pt/handle/10400.14/21110>

MANDOVA, Hana; PATRIZIO, Piera; LEDUC, Sylvain; KJÄRSTAD, Jan; WANG, Chuan; WETTERLUND, Elisabeth; KRAXNER, Florian; GALE, William. Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europa through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 218, p. 118-129, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.247>.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**, São Paulo Editora ATLAS, 2003. <https://epidemiologiagestao.files.wordpress.com/2017/05/aula-4-cic3aancia-e-conhecimento-cientc3adfico.pdf>

MEDEIROS, Fernando Tadeu Pereira de; GEERDES, Maarten; VLIET, Cor van Der; TOXOPEUS, Hisko. **Práticas Modernas para Operação de Alto-Forno**. 2007. 128 p. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4179572/mod_resource/content/2/Livro%20-%20Redu%C3%A7%C3%A3o%20de%20min%C3%A1rio%20de%20ferro%20em%20Alto-forno.pdf

MELLO, A. A. A., RAELE, R.; VAZ, S. L.; CAIGAWA, S. M. Competitividade e sustentabilidade ambiental da siderurgia brasileira. In: **SEMINÁRIO MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA: A EXPERIÊNCIA EMPRESARIAL SETORIAL E REGIONAL NO BRASIL, 1., 2008**, São Paulo. Experiências Setoriais na redução de gases de efeito estufa. São Paulo: Universidade de São Paulo, p. 31 – 51, 2008. <https://mudarfuturo.fea.usp.br/artigos/2009-experiencia-setorial-e-regional/competitividade-e-sustentabilidade-ambiental-da-siderurgia-brasileira/>

MOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução a siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5635026/mod_resource/content/0/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Siderurgia%20-%20Mour%C3%A3o%2C%20MB.pdf

MUSLEMANI, Hasan; LIANG, XI; KAESEHAGE, Katharina; ASCUI, Francisco; WILSON, Jeffrey. Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for ‘green steel’ products. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 315, p. 128127, set. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128127>.

NGUYEN, Thanh-Vinh. LE, Anh-Thang. NGUYEN, Manh-Tuan. **A Study on Steel Slag Replacing Sand in Concrete**. 2018 4a Conferência Internacional sobre Tecnologia Verde e Desenvolvimento Sustentável (GTSD), 2018, pp. 821-824. <http://dx.doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595690>

NWACHUKWU, Chinedu Maureen; WANG, Chuan; WETTERLUND, Elisabeth. Exploring the role of forest biomass in abating fossil CO₂ emissions in the iron and steel industry – The case of Sweden. *Applied Energy*, [S.L.], v. 288, p. 116558, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116558>.

- PAM. Produtos Ambientais Metalúrgicos, 2023. <http://www.pam.ind.br/historia.aspx>
- PINTO, Raphael Guimarães D.; SZKLO, Alexandre S.; RATHMANN, Regis. **CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector–From structural to intensity effects**. *Energy Policy*, [S.L.], v. 114, p. 380-393, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.040>.
- RIBEIRO, Vagner Cavalcanti *et al.* Contabilidade ambiental: visão teórica, definição e tendências. *Facit Business and Technology Journal*, v. 1, n. 1, 2017. <https://jnt1.websiteseuro.com/index.php/JNT/article/download/136/142>
- RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto Forno**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - ABM, 2009. https://www.blucher.com.br/processo-de-fabricacao-de-ferro-gusa-em-Alto-forno_9788577370030
- SOARES, L.; DIEHL, E. E.; VILVERT, A. F. **Módulo 6- Metodologia da pesquisa**. UNA-SUS, 2016. <https://ares.unasus.gov.br/acervo/handle/ARES/3482>
- TANAKA, M. T. **Estudo experimental de briquetes autorredutores e auto-aglomerantes de minério de ferro e carvão fóssil**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-26122014-115756/pt-br.php>
- TEIXEIRA, Cynthia Helena Soares Bouças *et al.* THE CIRCULAR ECONOMY IN THE AGE OF THE 4TH INDUSTRIAL REVOLUTION–THE USE OF TECHNOLOGY TOWARDS TRANSITION. *Revista Gestão & Tecnologia*, v. 22, n. 4, p. 64-89, 2022. <http://revistagt.fpl.emnuvens.com.br/get/article/view/2430>
- TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez *et al.* EMPREENDEDORISMO NO ENSINO PARA O CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS. *Humanidades & Inovação*, v. 8, n. 65, p. 419-433, 2021. <https://revista.unitins.br/index.php/humanidadeseinovacao/article/view/2321>
- WORLD STEEL ASSOCIATION, **Climate Action: World Steel Members Initiative**, 14 de junho de 2022, ArcelorMittal Publishes Concept for Global Low-Carbon Emissions Physical Steel Standard, <https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/arcelormittal-publishes-concept-for-global-low-carbon-emissions-physical-steel-standard>
- YIN, Robert K. **Case study research: Design and methods**. Thousand Oak, California: SAGE, 2009.
- ZHANG, Xinyu; JIAO, Kexin; ZHANG, Jianliang; GUO, Ziyu. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 306, p. 127259, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259>
- ZHAO, Jun; ZUO, Haibin; WANG, Yajie; WANG, Jingsong; XUE, Qingguo. Review of green and low-carbon ironmaking technology. *Ironmaking & Steelmaking*, [S.L.], v. 47, n. 3, p. 296-306, 2019. <http://dx.doi.org/10.1080/03019233.2019.1639029>.