



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais, Brasil



ASPECTOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS DO USO DA CARGA METÁLICA EM ACIARIA ELÉTRICA

Johny Luciano Moutinho

Ouro Preto, abril de 2023

Johny Luciano Moutinho

ASPECTOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS DO USO DA CARGA METÁLICA
EM ACIARIA ELÉTRICA

Proposta de monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Ouro Preto, abril de 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M934a Moutinho, Johny Luciano.
Aspectos técnicos e ambientais do uso da carga metálica em aciaria elétrica. [manuscrito] / Johny Luciano Moutinho. - 2023.
42 f.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Usinas siderúrgicas - Aciaria elétrica. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Sucata de metais. 3. Sucata de metais. I. Assis, Paulo Santos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Johny Luciano Moutinho

Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso da Carga Metálica em Aciaria Elétrica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 29 de abril de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Paulo Santos Assis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. Dr. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Paulo Santos Assis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Santos Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/04/2023, às 20:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0505326** e o código CRC **7233E840**.

RESUMO

O crescente aumento no consumo de aço e a necessidade de uma siderurgia mais sustentável com menos emissões, faz com que a aciaria elétrica ganhe representatividade no mercado de fabricação do aço ano após ano. O processo de reciclagem de sucata ferrosa gera um impacto positivo tanto para a economia quanto para o meio ambiente, uma vez que essa rota não depende exclusivamente de carga ferrosa virgem. Contudo, barreiras como a contaminação da sucata e até mesmo a indisponibilidade desse insumo em determinadas regiões faz com que seja necessária a utilização de outros materiais na composição da carga metálica, para que seja possível produzir um aço com composição química e propriedades desejadas. A importância de se avaliar a composição da carga metálica no forno elétrico a arco (FEA) se deve ao fato de que esse insumo representa mais da metade do custo de produção do aço por essa rota. Este trabalho de conclusão de curso trata-se de uma revisão narrativa na qual o objetivo foi avaliar a substituição da sucata por outros materiais que podem ser utilizados como matéria-prima na produção de aço, utilizando o forno elétrico a arco como reator metalúrgico. Além de fazer um comparativo entre as matérias-primas mais comuns nesse processo no cenário nacional e internacional. Atualmente, o ferro gusa e o ferro esponja são os substitutos parciais da sucata mais utilizados no forno elétrico a arco, o aporte de energia química e diluição de elementos tidos como contaminantes no aço são alguns dos principais ganhos provenientes da utilização de cargas alternativas nesse reator. O resultado disso é a capacidade de produzir de forma sustentável e economicamente viável praticamente todo e qualquer tipo de aço via FEA, principalmente no que diz respeito a aços especiais.

Palavras-chave: Aciaria elétrica. Aço. Matéria-prima. Sucata.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Fluxograma típico de uma aciaria semi-integrada.....	11
Figura 3.2 Principais componentes operacionais do FEA.....	13
Figura 3.3 Consumo de energia em FEA.....	14
Figura 3.4 Aplicabilidade dos métodos de análise química no FEA.....	17
Figura 3.5 Média do rendimento metálico do FEA, sem despoeiramento e com despoeiramento no <i>Shredder</i>	18
Figura 3.6 Composição da carga metálica dos maiores produtores de aço via FEA em 2006/23	
Figura 5.1 Balanço energético de um forno elétrico a arco.....	28
Figura 5.2 Variação no consumo de energia elétrica em função do grau de metalização.....	29
Figura 5.3 Efeito do %Si e do % de Ferro-gusa na escória espumante.....	30
Figura 5.4 Redução no consumo de energia elétrica a partir da utilização de ferro gusa.....	31
Figura 5.5 Variação do consumo de oxigênio com o percentual de ferro gusa.....	31

LISTA DE SIGLAS

B2 – Basicidade Binária

B4 – Basicidade Quaternária
BOF – Basic oxygen furnace
DRI – Direct reduced iron

EOF – Energy optimizing furnace
FEA – Forno elétrico a arco

GEE – Gases do efeito estufa
HBI – Hot Briquetted Iron
LD – Linz-Donawitz

LIBS – Plasma induzido por laser

OES – Espectrometria de emissão ótica

PGNAA – Análise imediata de ativação de nêutrons gama
UHP – Ultra high power

XRF – Fluorescência de raios X

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	9
2.1	Objetivo Geral	9
2.2	Objetivos Específicos	9
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	A produção do Aço	10
3.2	Forno Elétrico a Arco	11
3.3	Produção de Aço Via Aciaria Elétrica	13
3.4	Carga Metálica	15
3.4.1	Sucata	15
3.4.2	Ferro Gusa	18
3.4.3	DRI / HBI	20
3.4.4	Outras cargas metálicas	22
3.5	Composição da Carga Metálica	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	Desenho do Estudo	25
4.2	Busca Bibliográfica	25
4.3	Critérios de Inclusão	25
5	DISCUSSÃO	26
5.1	Efeito da carga metálica na qualidade do aço	26
5.2	Efeito da carga metálica no custo de produção e no consumo de energia elétrica	27
5.3	Efeito da carga metálica na produtividade	32
5.4	Aspectos ambientais	34
6	CONCLUSÕES	36
	REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Fatores como o aumento da aplicabilidade, fez com que o consumo mundial de aço tivesse um aumento substancialmente nos últimos anos. Atrelado a esse aquecimento no setor de produtos siderúrgicos, observa-se a alta no consumo do minério de ferro, carvão e demais insumos não renováveis que dão origem ao aço e suas ligas. As principais consequências do aumento da demanda e utilização do minério de ferro são a diminuição das reservas naturais e a geração de grande volume de sucata de aço (PASSOS, 2009).

A fim de realizar o uso sustentável dos recursos minerais, a indústria siderúrgica vem investindo em tecnologias que objetivam o melhor aproveitamento das matérias-primas e uma maior eficiência energética no processo de fabricação do aço. A escassez das reservas ricas em minério de ferro leva as mineradoras a utilizar minérios de teores cada vez mais baixos em suas usinas de beneficiamento, com processos de recuperação mais complexos e dispendiosos, o que eleva ainda mais o preço do minério (MAPELLI; BARAGIOLA, 2006).

A necessidade de disponibilizar no mercado um produto de qualidade com preço competitivo faz com que as siderúrgicas procurem rotas menos usuais para a produção de aço, sendo a aciaria elétrica uma opção acessível e mais sustentável para a produção desse material. Uma rota que ocupa o segundo lugar na produção mundial de aço, ficando atrás somente da aciaria a oxigênio é a aciaria elétrica, que utiliza como reator, o forno elétrico a arco (FEA) (RHODE et al., 2002).

A sucata é o principal insumo utilizado na fabricação de aço via FEA, no entanto nas últimas décadas, o volume de contaminantes presentes na sucata tem aumentado e a qualidade tem diminuído de forma proporcional, além da flutuação do seu preço e da indisponibilidade esporádica. Para a fabricação de produtos com faixa de composição química mais estreita, como é o caso da aciaria de planos, essas impurezas podem gerar defeitos, fragilizando o material e comprometendo sua aplicação, por não possuir as propriedades mecânicas adequadas e não atender às especificações do projeto final (VAISH, SINGH, GUFTA, 1994; WU DU et al, 2006).

Consequentemente, a utilização de cargas alternativas é aplicada como instrumento de diminuição de impactos dos fatores previamente mencionados. Cargas como Direct Reduced Iron (DRI), Hot Briquetted Iron (HBI) e ferro gusa sólido ou líquido vem sendo cada vez mais utilizadas e em percentuais crescentes como parte da carga metálica do FEA, com o

objetivo de atender às mais exigentes especificações na fabricação do aço, além de promover ganhos em várias etapas do processo (ABEL, HEIN, 2008). O FEA é um reator metalúrgico versátil e consolidado que tem a capacidade de operar com diferentes cargas metálicas, deixando de consumir até 1400 kg de minério de ferro e 740 kg de carvão mineral, por cada tonelada de sucata reciclada (BAUM, 2021).

No Brasil, foi implantada uma usina siderúrgica com um alto-forno e uma aciaria elétrica. Neste caso a ideia é utilizar gusa líquido na aciaria com dois objetivos principais:

- Melhor controle de elementos químicos (que seria o caso do uso de gusalíquido de alto-forno a carvão vegetal)
- Menor consumo de energia elétrica derivado do uso de gusa líquido.

(ASSIS,2022)

A premissa para a elaboração desse trabalho está ligada à necessidade do setor siderúrgico de reduzir o custo de produção, entregando um produto de qualidade e minimizando o impacto ambiental decorrente da produção do aço. O trabalho consiste na avaliação, a partir de uma revisão narrativa, das possíveis composições de carga metálica no FEA, considerando parâmetros como, qualidade do aço produzido, custo total de produção, consumo de energia elétrica, além da análise dos possíveis efeitos negativos decorrentes da contaminação da sucata e a viabilidade técnica e econômica do uso de programação linear para controle e seleção das cargas metálicas na produção de aço via FEA.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar revisão narrativa sobre a influência dos diferentes tipos de carga metálica e o impacto da composição da carga na qualidade e custo de produção do aço no forno elétrico a arco.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar pesquisa sobre as cargas usuais e alternativas para o forno elétrico a arco na produção de aço;
- Buscar na literatura dados sobre o consumo energético no processo de fusão e refinoprimário do aço com diferentes tipos de cargas metálicas;
- Analisar o impacto da contaminação de sucata utilizada no FEA;
- Apresentar os aspectos ambientais da rota secundária de produção de aço.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A produção do Aço

O aço é uma liga metálica composta pelos elementos, ferro e carbono, variando entre 0,008% e 2,11% em peso, além de outros elementos como silício, manganês, fósforo e enxofre em quantidades menores, não ultrapassando 1% em peso da liga (COSTA et al., 2007; MIRANDA, 2019).

O aço é um material com aplicações diversas em diferentes áreas e tem sua origem datada em 1856 na cidade de Sheffield, onde o britânico Henry Bessemer criou o processo Bessemer, uma rota de conversão de ferro gusa proveniente do alto-forno em uma liga com um teor de carbono reduzido, através do sopro de ar no banho de metal fundido (ÁVILA, 2011).

Atualmente, existem pelo menos quatro rotas na aciaria para produção de aço bruto. A primeira, responsável por 60% da produção mundial de aço e 80% da produção brasileira, utiliza os convertedores Linz-Donawitz (LD) ou basic oxygen furnace (BOF) que convertem o ferro gusa com aproximadamente 4,3% de carbono e outras impurezas em aço por meio da injeção de gás enriquecido em oxigênio, através de lanças que permeiam o banho de metal líquido e promovem a reação de descarburização (SPOONER et al., 2020). Uma segunda rota de produção do aço é a que utiliza o forno elétrico a arco (FEA). O FEA é um reator metalúrgico que converte a energia elétrica em energia térmica para fundir a carga metálica. Essa carga é composta principalmente por sucata de aço, podendo ser utilizado também ferro gusa, ferro esponja, ferro fundido e outros materiais. Além da etapa fusão da carga metálica, ocorrem ainda no FEA, os ajustes de composição química e temperatura do metal líquido que será utilizado nas etapas seguintes do processo de fabricação do aço. O FEA é comumente encontrado em usinas siderúrgicas chamadas de semi-integradas, que são aquelas que contemplam apenas as unidades de fusão, refino e conformação do aço. A Figura 3.1 representa um fluxograma típico das aciarias elétricas (MIRANDA, 2019).

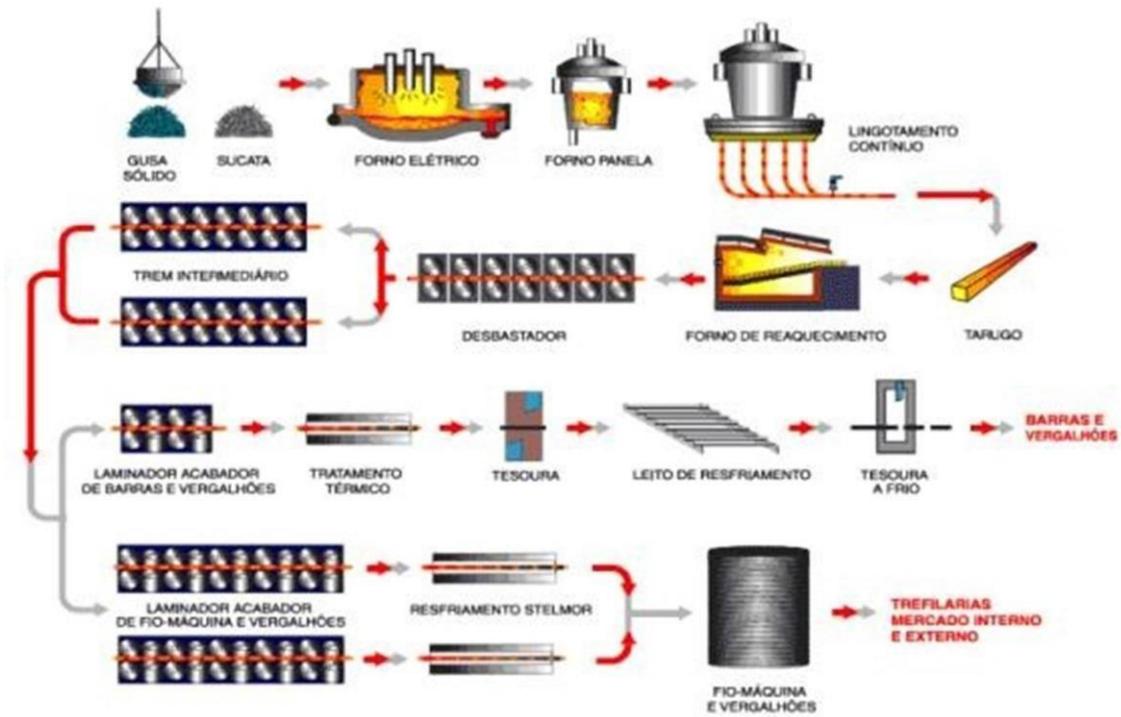


Figura 3.1 Fluxograma típico de uma aciaria semi-integrada (MIRANDA, 2019)

Outras duas rotas de produção de aço bruto são: Energy Optimizing Furnace (EOF) que é um forno a oxigênio, que utiliza um mecanismo de pré-aquecimento da carga sólida e o processo Siemens-Martin, que produz aço a partir de minério, carvão, ar e óleo combustível. Essas duas rotas são menos usuais representando menos de 5% da produção mundial (BARÃO et al., 2019; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

3.2 Forno Elétrico a Arco

A primeira fusão do aço através da utilização da eletricidade é datada de 1878. O experimento foi feito pelo alemão Willian Von Siemens, que criou um arco elétrico através de dois eletrodos horizontais. Esse arco elétrico promoveu a fusão da carga metálica após o aquecimento de maneira indireta pela radiação do arco. Além dessa contribuição, Willian Von Siemens, também patenteou a fusão via arco direto. Contudo, naquela época, essa tecnologia não era economicamente viável, em decorrência da escassez e do alto custo de energia elétrica, além da capacidade limitada dos equipamentos utilizados. Durante a segunda guerra mundial, em meio à corrida armamentista, a aciaria elétrica com seu custo reduzido e seu menor tempo para a implantação de uma usina, foi se tornando mais viável, e a produção de aço via fornos elétricos a arco, que era limitada tanto em quantidade quanto

em qualidade, passou a ser uma alternativa possível. Além disso, a possibilidade de operar com carga 100% fria tornou as mini-mills uma opção viável (ÁVILA, 2011; LAURENTI et al., 2005).

Normalmente, o carregamento do forno é feito pelo giro da abóbada na parte superior, existe ainda uma abertura por onde são adicionados formadores de escória e ligas (BIRAT, 2000). No carregamento do FEA são utilizados cestões onde os tipos de sucatas a serem utilizadas são acomodadas de maneira ordenada pelo pátio de sucatas. Comumente, para o carregamento completo do FEA são utilizados no mínimo dois cestões, sendo o segundo carregamento feito logo quando a fusão da primeira carga permite a perfeita acomodação dessa segunda parte da carga no forno (RIZZO, 2006; SILVA, MEI, 2010).

Resumidamente, podemos enumerar as etapas de operação do forno elétrico a arco da seguinte forma:

- 1- Carregamento do forno;
- 2- Fusão da carga sólida;
- 3- Refino primário do aço líquido;
- 4- 4Remoção da escória;
- 5- Vazamento do aço líquido (GERDAU, 2013a; VIEIRA, 2017).

É importante ressaltar que mesmo na aciaria elétrica a injeção de oxigênio é necessária para oxidar elementos presentes na carga metálica, além de agir como refinador primário e também promover a pós-combustão dos gases provenientes do processo (GERDAU, 2013a).

A Figura 3.2 mostra o FEA em corte e seus principais componentes de operação.

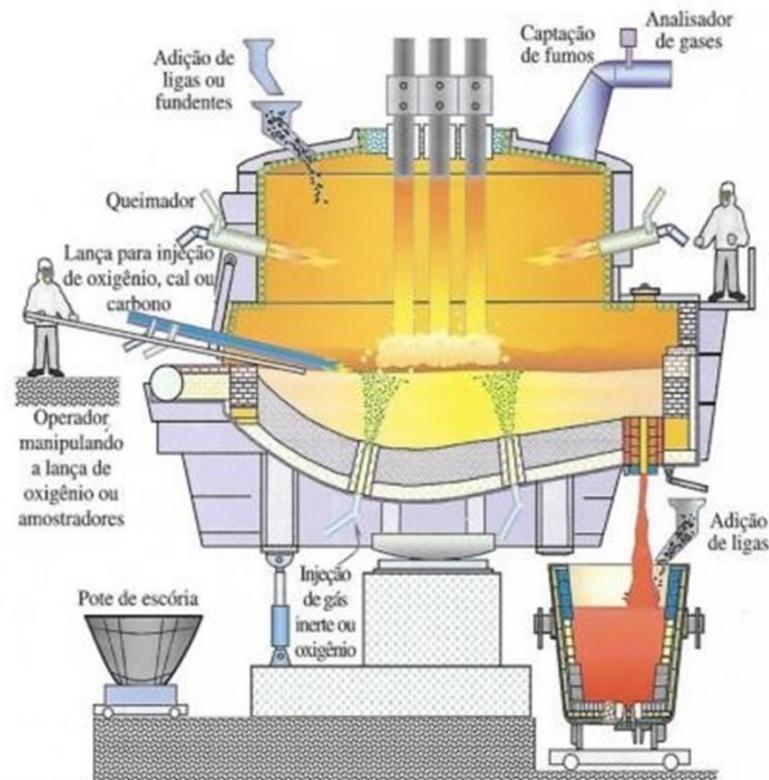


Figura 3.2 Principais componentes operacionais do FEA (RIZZO, 2006)

Existem ainda algumas variações que são originárias no FEA, entre elas temos o sistema Consteel. Nesse sistema as principais diferenças para o “FEA convencional” estão em primeiro lugar, no método de carregamento da sucata, o qual é feito por meio de uma ou mais esteiras transportadoras em substituição aos cestões, e em segundo, pela existência de um sistema de pré-aquecimento da sucata que reduz a quantidade de energia elétrica necessária para a fusão da carga (MEMOLI, FERRI, FREITAS, 2016).

3.3 Produção de Aço Via Aciaria Elétrica

Nos últimos anos, a aciaria elétrica vem ganhando força e se tornando cada vez mais eficiente, com menor consumo de energia por tonelada de metal produzido e uma produção flexível e intermitente, que permite produzir praticamente todo tipo de aço (RHODE et al., 2002).

Um estudo feito por Stubbles em 2009 demonstrou e fez uma projeção do consumo de energia elétrica em fornos elétricos a arco, utilizando uma carga composta por 100% de sucata sem pré-aquecimento, conforme ilustrado na Figura 3.3 (STUBBLES, 2009).

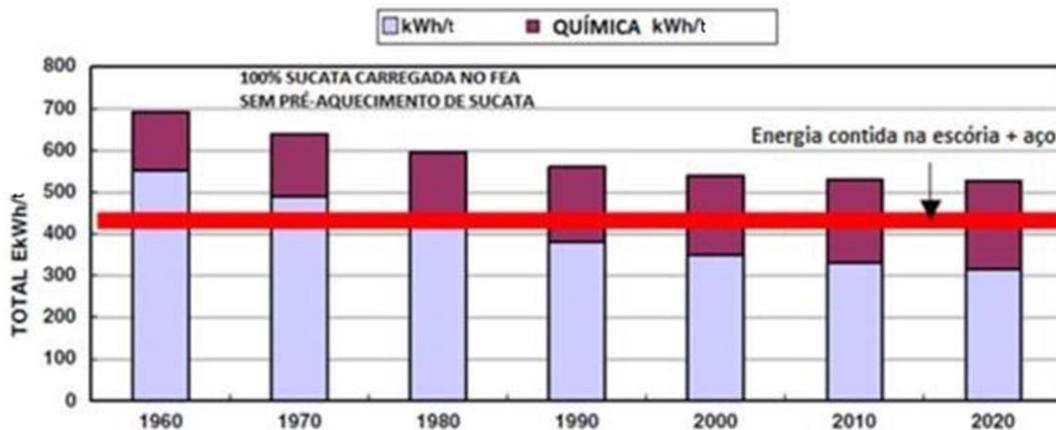


Figura 3.3 Consumo de energia em FEA (STUBBLES, 2009)

A otimização do uso da energia elétrica e tecnologias como os fornos de alta potência Ultra High Power (UHP), e outras que permitem a utilização de energia química como complemento do processo, aliadas a fatores como maior disponibilidade de sucata, e diminuição das reservas de minérios de ferro de alto teor, leva a expansão do uso dessa rota de produção do aço (STUBBLES, 2009).

Fornos atuais chegam a utilizar mais 40% de energia química em substituição à energia elétrica. A carga de carbono, de aproximadamente 12 kg por tonelada de aço líquido, é carregada de duas formas nos fornos elétricos a arco, a parte sólida é carregada junto da carga metálica e o restante é injetado por meio de lanças de injeção localizadas em determinadas regiões do forno (BIRAT, 2000; ECHTERHOF, 2021).

O aproveitamento da energia química proveniente das reações traz benefícios não somente na redução do consumo de energia elétrica, mas também prolonga a vida útil do equipamento. Com o aumento da potência dos fornos, foi necessário a diminuição da corrente do arco, afim de diminuir o desgaste dos eletrodos. Para isso foi necessário aumentar o comprimento do arco elétrico, porém, esse aumento do arco elétrico acentua o desgaste do revestimento refratário e dos painéis refrigerados do forno, para reverter esse problema e otimizar o processo, foi desenvolvida a técnica de escória espumante (BIRAT, 2000).

A prática de escória espumante é largamente aplicada na produção de aço via forno elétrico a arco, nela o carbono injetado no reator reduz óxido de ferro presente na carga metálica conforme a reação: $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$, e gera uma grande quantidade de pequenas bolhas de gás que, misturadas à escória, fazem com que ela espume sobre o metal líquido,

levando à diminuição do desgaste do refratário e do eletrodo durante a operação do FEA, além de diminuir o nível de ruído proveniente do processo de fusão (GRANT, BLOSTEIN, BUT, 2016).

3.4 Carga Metálica

Concebido inicialmente para operar com 100% de sucata, hoje em dia, o forno elétrico a arco é capaz de operar com um mix de cargas sólidas e líquidas. Fatores como alta qualidade do aço, aumento na produtividade, baixo teor de elementos residuais, instabilidade na disponibilidade da sucata e a qualidade da sucata fizeram com que as siderúrgicas buscassem cargas alternativas viáveis que pudessem substituir em parte a sucata utilizada no FEA (VIEIRA, 2017; WU DU et al., 2006).

A capacidade de operar com diferentes cargas metálicas, faz do FEA um equipamento versátil e ao mesmo tempo complexo, uma vez que as características do aço produzido estão diretamente ligadas à matéria-prima utilizada no processo (MIRANDA, 2019).

3.4.1 Sucata

Sendo a sucata de aço responsável por 60% a 80% do custo da produção do aço via aciaria elétrica, é de grande importância o estudo dessa carga visando otimizar a utilização dos recursos e minimizar o custo do processo (FRANÇA et al., 2012; HASSAN; et al., 2021).

Sucata de aço é todo resíduo metálico composto de maneira simplificada por ferro e no máximo 2,11% de carbono, que sejam passíveis de reciclagem, sendo o aço o material mais reciclado em todo mundo. O consumo de sucata pela indústria siderúrgica aumentou 12% entre os anos de 2006 e 2016, saltando de 500 para 560 milhões de toneladas. Existem duas principais classificações da sucata pelas normas brasileiras, uma primeira que classifica a sucata com base na origem do material:

- Interna: todo resíduo produzido dentro da própria usina passível de reciclagem, com carepas, cascões de panela, lingotes curtos, etc.
- De processamento: resíduo metálico oriundo do processo de conformação mecânica, como recortes de tiras, restos de estamparia, etc.
- De obsolescência: conhecido como ferro velho, oriunda de bens de consumo já

obsoletos, sendo essa a mais importante fonte de resíduo metálico. Em 2016 a sucata de obsolescência representou 42% de toda a sucata utilizada na produção de aço(MIRANDA, 2019).

Na segunda classificação, a sucata é classificada conforme o modo de preparação, podendo ser: não preparada, prensada, briquetada, tesourada, fragmentada (shredded), quebrada, cortada ou recuperada (FRANÇA et al., 2012).

Existem ainda classificações específicas que variam de uma siderúrgica para outra, nessas classificações internas o número de subclasses de sucatas aumenta em função de características como composição química, tamanho, origem da sucata, fazendo com que na produção de um aço carbono via aciaria elétrica tenha até 20 tipos de sucatas diferentes, e até 100 tipos de sucatas distintas para a fabricação de aços especiais, com alta carga de elementos de ligas e custo elevado de produção, além dos demais tipos de cargas utilizadas (SANDBERG,2005).A classificação pelo aspecto físico da sucata também é adotada, uma vez que a densidade tem grande variação nos diversos tipos de sucata existentes em uma aciaria. Sucata a granel possui densidade na ordem de $1t/m^3$, o que pode levar a um número alto de carregamentos em uma única corrida. Dessa forma, é importante atentar-se para a classificação pelo aspecto físico, para balancear a utilização da sucata na carga de modo a não impactar a produtividade (BIRAT, 2000).

Com o aumento da utilização da sucata de obsolescência observa-se uma presença maior de contaminantes na produção do aço.Com isso faz-se necessário um maior cuidado na inspeção, no controle da qualidade e no processamento da sucata utilizada (MELLO et al., 2008). As impurezas presentes na sucata podem ser classificadas em dois tipos:

Impureza intrínseca: é aquela que faz parte da sucata, como pinturas e ferrugem, essas são possíveis de serem mensuradas previamente e não tem impacto significativo no rendimento, desde que em pequenas quantidades (VIEIRA, 2017).

Impureza extrínseca: São aquelas que estão misturadas na sucata e não podem ser mensuradas, como matéria orgânica, Essas impurezas na maioria das vezes vão para a escória, além de gerar gases no processo, diminuem o rendimento do FEA (VIEIRA, 2017).

Um aspecto importante a ser observado no que diz respeito à contaminação da sucata é em relação ao rendimento metálico, uma grande quantidade de contaminantes pode fazer com que o rendimento do FEA caia consideravelmente (VIEIRA, 2017).

Elementos como Cu e Sn, são contaminantes comuns em sucatas de obsolescência, Ni, Mo, Co, Sb e W, também são contaminantes encontrados, e costumam ser utilizados como indicador de qualidade da sucata. Técnicas como Espectrometria de Emissão Óptica (OES) são utilizadas para identificar e quantificar elementos residuais presentes no aço proveniente do FEA, o que auxilia na seleção da sucata utilizada. Além disso, técnicas sem contato, utilizando fluorescência de raios X (XRF) e espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) são utilizadas durante a preparação da sucata para identificar elementos residuais (Figura 3.4) (MIRANDA, 2019).

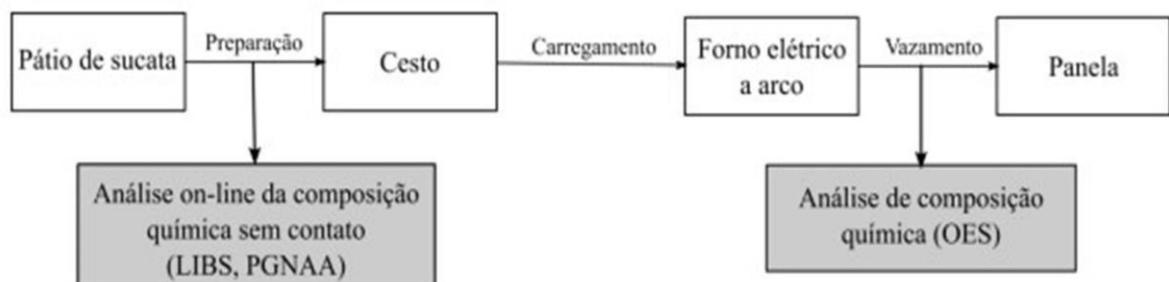


Figura 3.4 Aplicabilidade dos métodos de análise química no FEA (MIRANDA,2019)

Além da presença de impurezas, a sucata de obsolescência possui tamanho e formas diversas, o que dificulta sua utilização direta no forno pela baixa densidade aparente, podendo também oferecer risco aos operadores e ao equipamento. Para se obter um material de maior qualidade, em algumas usinas a sucata de obsolescência é processada em um equipamento denominado Shredder. No Shredder a sucata passa por um processo de cominuição, dando origem a um material com tamanho de partícula mais homogêneo, além de quantidade de elementos residuais distribuídos de forma mais homogênea. Ainda no processamento da sucata no Shredder, pode ser aplicado um sistema de despoeiramento de sucata, o que eleva ainda mais o rendimento metálico (VIEIRA, 2017).

Vieira (2017) apresenta em seu estudo um comparativo da média de rendimento de um forno elétrico a arco com e sem o sistema de despoeiramento de sucata no Shredder. Como mostrado na figura 3.5 o sistema de despoeiramento de sucata aumentou o rendimento metálico do FEA em 1,34%

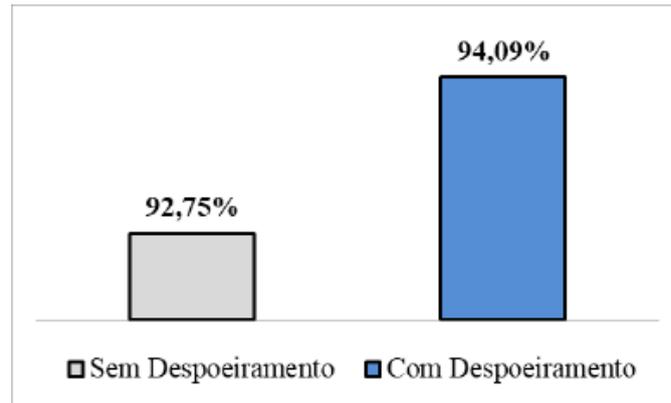


Figura 3.5: Média do rendimento metálico do FEA, sem despoeiramento e com despoeiramento no *Shredder*(VIEIRA, 2017)

3.4.2 Ferro Gusa

Em regiões com baixa disponibilidade de sucata ou com custo elevado, é comum realizar a substituição de sucata por materiais virgens, como o ferro gusa. Esse atua principalmente como diluente de impurezas presente na sucata, fonte de carbono e elementos oxidáveis e também auxilia na redução dos gases hidrogênio e nitrogênio presentes no aço líquido (WU DU et al., 2006).

O ferro gusa é produzido no alto forno, onde a carga de minério, coque ou carvão vegetal e fundentes é carregada pela parte superior do reator, enquanto o ar enriquecido com oxigênio é soprado pelas ventaneiras na parte inferior do forno segue em contra fluxo no sentido ascendente. O ferro gusa é uma mistura líquida de ferro e cerca de 4% a 5% de carbono na temperatura de 1450°C aproximadamente (SANDBERG, 2005).

No Brasil o ferro gusa é amplamente utilizado como matéria-prima na produção de aço via aciaria elétrica. O ferro gusa é um insumo que traz benefícios quando utilizado no FEA e apresenta algumas vantagens em relação à sucata. O gusa apresenta uma composição química mais controlada e oferece maior aporte de energia química ao processo devido a presença de elementos como carbono e silício, além de uma maior densidade, o que gera uma maior produtividade da aciaria. Pode ser utilizado tanto no estado sólido quanto líquido, o ferro gusa deve apresentar uma composição química específica para utilização no FEA.

Quando utilizado no estado sólido, o gusa deve compor no máximo 20% da carga metálica. Essa restrição se dá ao fato da maior densidade aparente que aumenta o tempo de fusão do ferro gusa, quando comparado à sucata. Um percentual de ferro gusa sólido acima

de 20% acarreta na redução da eficiência do processo de descarburização e, como consequência, um possível desbalanceamento químico, aumentando o teor de carbono do aço (VIEIRA, 2017).

Comumente, o uso de ferro gusa sólido no FEA com valores entre 10% a 15% proporciona uma redução do consumo de energia elétrica no processo, contudo existem estudos com utilização de partes mais representativas de ferro gusa sólido na produção de aço via FEA. Wu Du, et al. (2006) demonstraram em seu estudo que uma empresa carregando no FEA 35,5% de ferro gusa e 64,5% de sucata, obteve reduções significativas no consumo de energia elétrica, eletrodos e menor desgaste de refratários, além de diminuição no tempo de aquecimento. Essa redução ocorre principalmente pela reação exotérmica de oxidação de elementos como silício e manganês presente no ferro gusa pelo oxigênio. O silício é convertido em sílica, que é transferida para a escória. A escória, além de promover a absorção dos óxidos, também é responsável por proteger o refratário da irradiação do arco elétrico, reduzir as perdas térmicas e metálicas do metal líquido e proteger o aço contra a absorção de hidrogênio e oxigênio. Entretanto, ocorre um aumento no volume de escória gerada no processo, uma vez que a adição de cal se faz necessária, visando manter a basicidade da escória, conforme equação 1 (VIEIRA, 2017).

$$B2 = \%CaO / \%SiO_2 \text{ (VIEIRA, 2017)}$$

B2 = Basicidade Binária

$\%CaO$ = óxido de cálcio (% em peso);

$\%SiO_2$ = sílica (% em peso).

O aumento do volume de escória em função da oxidação de elementos como Si e Mn presentes no gusa, reduz o teor de FeO da escória, característica indesejável para o processo de desfosforação (WU DU et al., 2006). Em um FEA atual a composição da escória deve conter 20% de FeO, além de 38% de CaO e supersaturação de MgO em 10% visando reduzir o desgaste do refratário (GYLLENRAM, WEI, JÖNSSON, 2015). A composição da escória do FEA deve possuir um desequilíbrio para o lado básico, (quociente entre os óxidos "básicos" e os "ácidos" da escória deve ser maior do que a unidade), uma vez que os refratários utilizados no reator são, em sua grande maioria, básicos, fazendo com que os estes sofram desgastes acentuados na presença de escórias ácidas (PAULINO et al., 2014).

Apesar de a maioria de elementos contaminantes estarem em menor quantidade no ferro gusa, os teores de P e S são bem maiores no ferro gusa, o teor de fósforo no ferro gusa sólido, por exemplo, é da ordem de 0,05% a 0,08%, bem maiores do que os valores comumente encontrados na sucata. A presença desses elementos exigirá etapas de dessulfuração e desfosforação maiores, impactando de forma negativa no consumo energético e na produtividade (WU DU et al., 2006).

3.4.3 DRI / HBI

A principal motivação para se utilizar fontes de ferro proveniente da redução direta como o DRI e o HBI é semelhante ao ferro gusa, ambos atuam na diluição de elementos contaminantes presentes na sucata (DRESSEL, 2010).

O ferro esponja é um material com composição química bem definida e com poucos contaminantes. Ele é produzido a partir da redução direta do minério de ferro em fornos rotativos ou de cuba, sem que ocorra fusão do material, utilizando-se o gás natural reformado como reator. O fato de o ferro esponja ser uma matéria prima mais pura viabiliza a sua utilização como substituto de parte da sucata do FEA (WU DU et al., 2006).

A utilização de DRI favorece a formação de escória espumante, promovendo a remoção de impurezas como o nitrogênio. Com valores reduzidos de nitrogênio no aço é favorecida a utilização do aço produzido via aciaria elétrica no lingotamento de planos e longos, com qualidade equivalente ao material produzido via aciaria a oxigênio (DRESSEL, 2010).

Diferentemente do ferro gusa, o percentual de fósforo e enxofre no ferro esponja ou ferro esponja briquetado a quente é muito baixo, o que é vantajoso para o processo, reduzindo os tempos de refino (WU DU et al., 2006). Entretanto, a utilização de DRI acarreta um aumento no consumo de energia elétrica na fabricação de aço via FEA, isso devido ao grau de metalização do DRI (DRESSEL, 2010). O grau de metalização é dado pela equação2:

$$GM = \text{Fe MET} / \text{Fe TOT} \times 100$$

onde:

GM - grau de metalização (% em peso);

Fe MET - percentual de ferro metalizado (% em peso);

Fe TOT - percentual de ferro total (% em peso) (ARAÚJO, 2007).

Dessa forma, quanto maior o grau de metalização menor o consumo de energia elétrica. Esse aumento do consumo de energia é proveniente da reação endotérmica de redução da wustita (FeO) em Fe. Resultados práticos mostram que, enquanto um FEA carregado com 100% de sucata consome de 400 kwh/t a 435 kwh/t, mudando a carga para 98,2% de DRI e o complemento de sucata, o consumo de energia sobe para o patamar de 635 kwh/t de aço produzida (DRESSEL, 2010).

O HBI, apesar de ser produzido em um sistema semelhante ao DRI, possui características que tornam seu uso mais vantajoso em comparação ao DRI para aplicação em FEAs. O processo de briquetagem a quente faz com que o ferro esponja tenha maior densidade, tamanho mais controlado, maior condutividade térmica (semelhante a da sucata). O carregamento pode ocorrer de forma contínua ou em bateladas, desde que o forno possua os componentes para tal procedimento. Os mesmos equipamentos que fazem a movimentação da sucata são compatíveis para a sua movimentação (ARAÚJO, 2007). Dessa forma, o HBI tem características que fazem com que seu comportamento no FEA seja semelhante ao do gusa sólido, porém com teores de fósforo e enxofre menos significativos (WU DU et al., 2006).

Sobre os óxidos presentes no ferro esponja, é importante ressaltar que os óxidos básicos, como CaO e MgO são inseridos intencionalmente com objetivo de balancear a basicidade do pré reduzido, uma vez que os óxidos ácidos presentes nesse material, como SiO₂ e Al₂O₃ são oriundos do próprio minério de ferro. Dessa forma o tipo de escória proveniente do ferro esponja é caracterizada pela basicidade quaternária (B4), conforme equação 3 (ARAÚJO, 2007).

$$B4 = \frac{\%(\text{CaO}+\text{MgO})}{\%(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)}$$

A geração de grandes volumes de escória também é um problema na utilização de DRI / HBI. Essas cargas possuem em sua composição teores elevados de Si e SiO₂ em comparação a sucata, o que exige a adição de maiores quantidades de dolomita para que o desgaste do refratário não seja acentuado (GYLLENRAM, WEI, JÖNSSON, 2015).

3.4.4 Outras cargas metálicas

Fontes de ferro menos usuais também podem ser aplicadas como substitutos à sucata no FEA. O carboneto de ferro é uma delas, a partir da década de 1970 o carboneto de ferro começou a ser testado como substituto da sucata no forno elétrico a arco. Esse material produzido a partir de pó de ferro reduzido com gás natural resulta em um material duro e quebradiço com aspecto arenoso. O carboneto de ferro possui em sua estrutura três átomos de ferro e um átomo de carbono (Fe_3C), e possui propriedades como baixo teor de elementos residuais, estabilidade química e menor consumo de energia elétrica, podendo também passar por um processo de aglomeração e briquetagem antes de ser carregado no reator, o que viabilizam a sua utilização no FEA, principalmente na produção de aços especiais. Contudo, o alto ponto de fusão do carboneto de ferro faz com que seja mais vantajoso a utilização desse material granulado ao invés de briquetes, além disso, o custo desse insumo inviabiliza sua utilização em larga escala (WU DU et al., 2006; VAISH, SINGH, GUFTA, 1994).

Por fim, existem ainda materiais com menor utilização mas que também possuem propriedades adequadas para serem utilizados em substituição da sucata na produção de aço via aciaria elétrica como o ferro granulado descarbonetado, pelotas pré reduzidas. Estão em andamento também, estudos para utilização de materiais como briquetes de carepa de aciaria, objetivando um maior aproveitamento dos recursos disponíveis (WU DU et al., 2006; VAISH, SINGH, GUFTA, 1994; BUZIN, 2009).

3.5 Composição da Carga Metálica

Nas aciarias, frequentemente, os materiais que irão compor a carga metálica e seus respectivos percentuais são determinados por ferramentas computacionais, onde um modelo matemático permite determinar de forma rápida e assertiva o melhor mix de materiais, para a produção de um determinado aço (RAYHANIZADEH et al., 2020; FRANÇA et al., 2012).

A programação linear busca alcançar uma solução ótima com base nas restrições das variáveis, criando uma estrutura de hierarquia e pesos relativos entre elas (RAYHANIZADEH et al., 2020; FRANÇA et al., 2012).

A equipe do pátio de sucata fará a preparação dos cartões para abastecimento do FEA a partir da definição do tipo de aço que será produzido, as características das sucatas disponíveis e o cenário atual do mercado de sucatas, para isso é necessário que a

programação forneça previamente o plano de produção para que haja disponibilidade dos materiais necessários para a produção (ARAÚJO, 2007; GERDAU, 2013b).

Cada um dos tipos de cargas metálicas passíveis de serem aplicadas na aciaria elétricas já discutidas apresentam aspectos positivos e também limitações quanto ao seu percentual de aplicação. A disponibilidade e a qualidade da sucata, principalmente de obsolescência, é uma das limitações do uso da sucata como matéria-prima. Por outro lado, a combinação da sucata com o ferro gusa líquido oferece uma composição química mais controlada, fornece energia térmica para o processo, diminuindo o gasto com energia elétrica. A associação de sucata e ferro gusa sólido em quantidades adequadas reduz o consumo de energia elétrica através das reações exotérmicas de formação de óxidos, mas gera, em contrapartida, um maior volume de escória (FRANÇA et al., 2012).

A figura 3.6 mostra as cargas metálicas utilizadas nos 25 maiores produtores de aço e seus respectivos percentuais.

Dados 2006	Posição como Produtor de Aço via FEA	Aço Bruto Produzido Via EAF	Sucata		Ferro-Gusa		DRVHBI		total
		milhões de t	kg/t aço bruto	% em Peso	kg/t aço bruto	% em Peso	kg/t aço bruto	% em Peso	
China	1	59,0	731	66,5%	360	32,7%	9	0,8%	1100
Estados Unidos	2	56,3	980	84,5%	139	12,0%	41	3,5%	1160
Japão	3	29,2	1085	96,2%	43	3,8%	0	0,0%	1128
Coreia do Sul	4	21,1	1169	96,6%	41	3,4%	0	0,0%	1210
Oriente Médio	5	19,5	235	21,4%	0	0,0%	865	78,6%	1100
Itália	6	18,7	1024	90,3%	90	7,9%	20	1,8%	1134
Índia	7	18,6	408	34,3%	153	12,9%	628	52,8%	1189
Turquia	8	16,9	1078	98,0%	22	2,0%	0	0,0%	1100
Rússia	9	15,7	851	81,5%	0	0,0%	193	18,5%	1044
Alemanha	10	14,6	1039	91,1%	61	5,3%	41	3,6%	1141
Espanha	11	13,4	1086	92,1%	50	4,2%	43	3,6%	1179
México	12	11,5	537	47,5%	37	3,3%	556	49,2%	1130
Taiwan	13	9,3	1163	93,4%	82	6,6%	0	0,0%	1245
França	14	7,5	1100	95,2%	25	2,2%	30	2,6%	1155
Brasil	15	6,9	607	52,1%	496	42,6%	61	5,2%	1164
Canadá	16	6,7	1008	93,3%	7	0,6%	85	6,0%	1080
Ucrânia	17	6,1	964	87,6%	48	4,4%	88	8,0%	1100
Venezuela	18	4,9	357	26,2%	0	0,0%	1004	73,8%	1361
África do Sul	19	4,2	626	55,3%	102	9,0%	405	35,7%	1133
Polónia	20	4,1	1066	93,3%	75	6,8%	1	0,1%	1142
Bélgica	21	3,4	946	85,9%	146	13,3%	9	0,8%	1101
Argentina	22	2,9	403	35,5%	35	3,1%	696	61,4%	1134
Reino Unido	23	2,8	1133	97,3%	32	2,7%	0	0,0%	1165
Luxemburgo	24	2,5	1130	100,0%	0	0,0%	0	0,0%	1130
Suécia	25	1,7	1090	88,6%	140	11,4%	0	0,0%	1230

Figura 3.6- Composição da carga metálica dos maiores produtores de aço via FEA em 2006 (ARAÚJO, 2007)

Uma ferramenta que vem sendo estudada no balanço da mistura de sucata e outras cargas metálicas é a programação linear. Trata-se de uma solução matemática que permite alcançar uma relação ótima que minimiza o custo de produção do aço, dentro das especificações desejadas ao produto (SANDBERG, 2005).

A partir de dados como custo das diferentes cargas metálicas, consumo por tonelada de aço produzido, custo de energia elétrica, rendimento da matéria-prima, densidade, consumo

de eletrodo e de refratário, são construídas relações matemáticas que são utilizadas na resolução de problemas para o balanço da carga no FEA (FRANÇA et al., 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenho do Estudo

O método utilizado neste trabalho foi o de revisão narrativa da literatura, que consiste na revisão de artigos científicos, neste caso, sobre a composição da carga ferrífera do processo de refino primário do aço em um forno elétrico a arco.

4.2 Busca Bibliográfica

Foi realizado um levantamento da literatura, no período de março de 2022 a maio de 2022, a partir da busca de descritores nas bases de dados on-line: SCIENCE DIRECT, SCOPUS, periódicos CAPES e Google Acadêmico.

Não foram utilizados filtros para a seleção desses artigos, foi feita uma revisão narrativa com os artigos julgados como relevantes para o trabalho.

Os descritores utilizados foram: Forno elétrico a arco, carga metálica, aciaria, sucata, energia elétrica, aciaria elétrica, metallic charging.

As combinações utilizadas nas buscas foram: carga metálica e forno elétrico a arco, aciaria e energia elétrica.

4.3 Critérios de Inclusão

- Artigos com data de publicação do período de 1994 a 2022;
- Artigos nas línguas inglesa e portuguesa. Os artigos selecionados poderão estar em português ou inglês, porém sem restrições quanto aos países de publicação.

5 DISCUSSÃO

5.1 Efeito da carga metálica na qualidade do aço

A qualidade do aço produzido via aciaria elétrica está vinculada à qualidade da sucata e dos materiais utilizados em sua fabricação. A literatura é vasta no que diz respeito ao estudo de contaminantes da sucata como Cu e Sn. Entretanto, existem contaminantes menos estudados como Sb, W e Mo, que podem afetar a qualidade do aço e suas propriedades, como demonstrado por Miranda e colaboradores (2019) em seu estudo.

Em suas análises, Miranda et al. (2019) verificaram que mesmo em baixas concentrações, o antimônio pode favorecer a nucleação de trincas a partir da descoesão dos contornos de grão. Além disso, o estudo mostra que contaminantes como Co podem afetar as propriedades magnéticas da liga, fazendo com que o aço permaneça ferromagnético.

Outro ponto importante levantado por Miranda e colaboradores (2019) é que a identificação de elementos químicos menos comuns na sucata pode auxiliar na classificação deste material, uma vez que a aplicabilidade desses elementos em materiais não ferrosos é superior a 80%, o que indica a presença de materiais não ferrosos e/ou não metalúrgicos misturados à sucata.

A prática de diluição de elementos residuais presentes na sucata com a adição de ferro primário como gusa e ferro esponja é até o momento a única prática economicamente viável na fabricação de aço via FEA, ainda que seja um método paliativo (MIRANDA et al., 2019)

De maneira geral, parece haver uma concordância comum e positiva sobre a utilização de ferro esponja no quesito qualidade do aço. Onde vários autores tratam esse insumo como “diluidor de impurezas” presentes no aço.

Dressel (2010) mostrou em seu estudo que a substituição de sucata por DRI ou HBI se mostra eficiente no papel de diluição de elementos contaminantes: Cu, Ni, Sn, Mo e Cr. Além disso, o autor também relata em seu estudo a obtenção de teores de Nitrogênio da ordem de 0,0015%, quando o FEA é carregado com 100% de DRI, e de 0,0030% a 0,0065% quando utilizado 65% de DRI e o complemento de sucata, o que favorece a utilização desse insumo na fabricação de aço via aciaria elétrica, uma vez que grande pratica da aplicação de aços planos e longos requerem teores de nitrogênio até 0,0060%. Vaish, Singh, e Gufta (1994), assim como Dressel (2010) demonstram ganhos decorrentes da utilização de ferro

esponja na produção de aço via FEA, relatando baixos teores de Enxofre (S), Fosforo (P) e também o Oxigênio (O), característica desejadas no produto final.

Além disso, a homogeneidade química e a facilidade de manuseio e estocagem fazem do ferro esponja uma carga competitiva na produção de aço via aciaria elétrica, segundo Melomi, Ferri e Freitas (2016), principalmente quando é formado um sistema integrado entre redução direta e forno elétrico a arco, possibilitando dessa forma o carregamento a quente do DRI gerando ganhos ainda maiores ao processo.

Assim como o ferro esponja, o gusa, seja ele líquido ou sólido, age como diluidor de impurezas presentes na sucata. Propriedades como alta pureza e homogeneidade química fazem do gusa um produto de ótima qualidade na produção de aço (FRANÇA et al, 2012). Entretanto, conforme Wu Du e colaboradores (2006) trazem em seu estudo, se por um lado o gusa tem papel de diluir elementos residuais e diminuição dos teores dos gases O₂ e H₂, em contrapartida ele possui uma grande quantidade de S e P quando comparado ao DRI/HBI, o que exige etapas específicas para remoção desses contaminantes, que afetam significativamente a qualidade do aço.

Conforme mencionado por Gyllenram, Wei e Jönson (2015), no futuro será cada vez maior a utilização de materiais virgem como ferro esponja e gusa na fabricação de aço via aciaria elétrica com o intuito principal de diluir os elementos contaminantes presentes na sucata. Echterhof (2021) complementa o que foi projetado por Gyllenram, Wei e Jönson (2015) e ainda menciona a utilização de utilização de H₂ livre de GEE no processo de redução direta, reforçando o compromisso de uma siderurgia mais sustentável.

5.2 Efeito da carga metálica no custo de produção e no consumo de energia elétrica

A carga metálica é responsável por mais de 60% do custo de produção do aço líquido via forno elétrico a arco, dessa forma, atuar na otimização dessa variável trará maiores ganhos financeiros para o processo (HORNBY, 2015).

A figura 5.1 traz um balanço energético típico de um forno elétrico a arco.

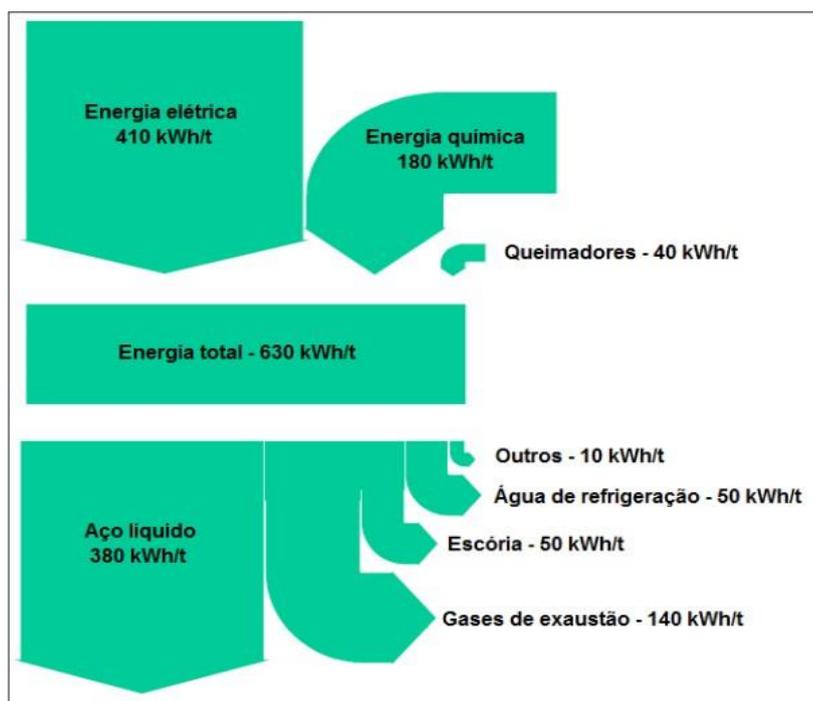


Figura 5.1 - Balanço energético de um forno elétrico a arco (SALLES, 2016)

A otimização da composição da carga metálica vai muito além da análise de custo e disponibilidade, ela envolve um estudo mais amplo, que engloba entre outros aspectos o estoque disponível em determinada época, a geração interna, além disso, é importante avaliar o valor em uso dos insumos. A análise de todos esses fatores trará como resultado um produto com a qualidade adequada e custo mínimo de produção (HORNBY, 2015).

O FeO presente no ferro esponja, favorece a formação da escória espumante. Contudo, a reação de redução da wustita é endotérmica, dessa forma, quanto menor o grau de metalização do ferro esponja, maior será o consumo de energia elétrica. Outro ônus que provém da utilização do DRI no FEA é o aumento no volume de escória em função da grande quantidade de ganga presente nesse material, elevando ainda mais o consumo energético (DRESSEL, 2010).

A figura 5.2 mostra a variação no consumo de energia elétrica em função do grau de metalização para alguns percentuais de ferro esponja.

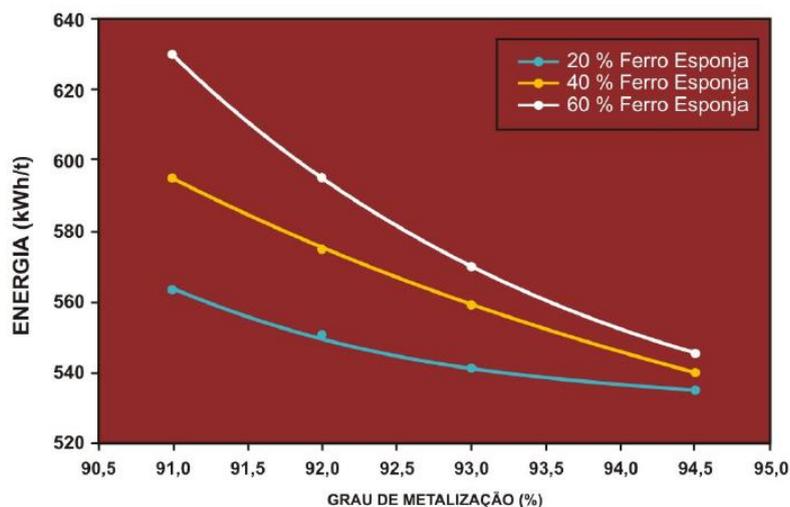


Figura 5.2 – Variação no consumo de energia elétrica em função do grau de metalização (ARAÚJO, 2007).

A utilização de Ferro gusa como substituto parcial da sucata reduz o consumo de energia elétrica não somente pela temperatura em que a liga de ferro carbono é carregada no FEA quando utilizado no estado líquido, mas também pela energia química gerada pela reação de oxidação da grande quantidade de carbono e silício presente na carga, fornecendo mais calor para o processo independente do estado físico que o gusa é carregado (VAISH, SINGH, GUFTA, 1994). Entretanto, devido a sua alta densidade, a disposição do ferro gusa sólido no carregamento do FEA, assim como o HBI, deve ser feita de maneira criteriosa, pois grandes concentrações em lugares específicos do reator pode acarretar dificuldades no processo de fusão, exigindo maior quantidade de combustível nos queimadores e consequentemente um maior tap-to-tap (GERDAU, 2012).

Outro aspecto negativo na utilização de gusa é com relação ao alto teor de Si. Além de gerar um volume de escória maior do que quando carregado apenas com sucata, termodinamicamente, a reação de formação de SiO_2 é mais favorável do que a reação de oxidação do Fe em FeO, levando a um atraso na formação da escória espumante, como mostrado na figura 5.3 (GERDAU, 2012).

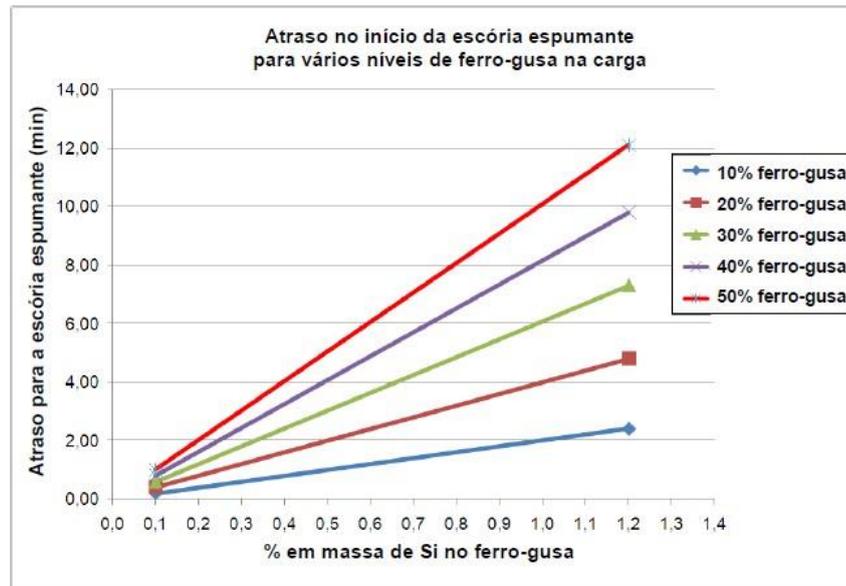


Figura 5.3 – Efeito do %Si e do % de Ferro-gusa na escória espumante (GERDAU, 2012).

Em seu estudo prático, Gomes (2012) mostra que a utilização de gusa líquido com percentual variando entre 34% e 40% em um FEA com capacidade de 40t a economia de energia elétrica é da ordem de 7,5 kWh/t para cada 1% de ferro gusa líquido adicionado a carga. Já para percentuais de utilização de ferro gusa líquido inferiores a 34% não foram observadas reduções significativas no consumo de energia elétrica, contudo as usinas integradas que fazem a utilização de ferro gusa líquido em substituição a sucata no forno elétrico a arco, geralmente utilizam o máximo de carga líquida em substituição a sucata, visando aproveitar o máximo de energia térmica e química.

Umansky e Dumova (2018) mostram que a redução do consumo de energia elétrica utilizando ferro gusa sólido ou líquido pode ser descrito por funções de primeiro grau, como apresentado na figura 5.4.

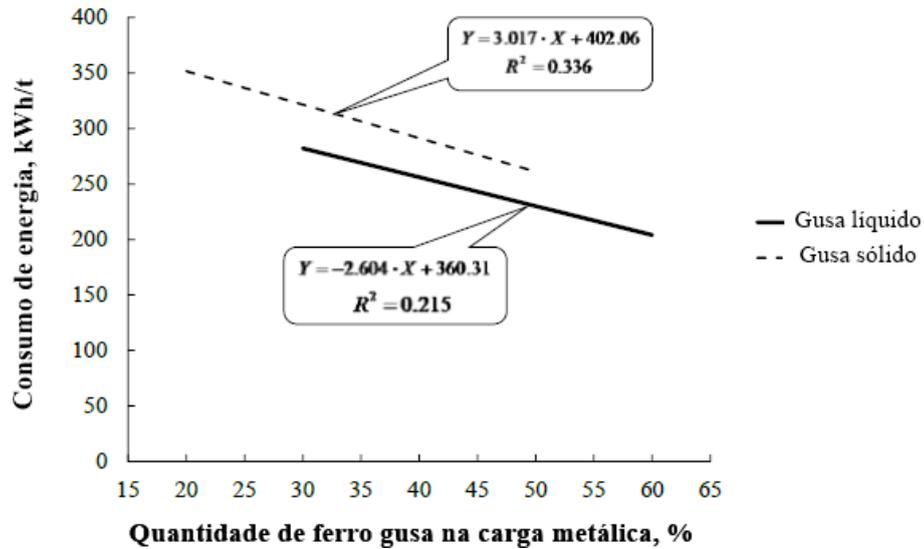


Figura 5.4 -Redução no consumo de energia elétrica a partir da utilização de ferro gusa (Umansky e Dumova, 2018)

A utilização de ferro gusa no FEA possui reflexo também no consumo de oxigênio, nesse aspecto o uso de ferro gusa não é vantajoso, pois quanto maior o percentual de ferro gusa, maior o teor de carbono no aço líquido, conseqüentemente será necessário um volume maior de injeção de oxigênio para oxidação do carbono excedente. No estudo de Umansky e Dumova (2018) é possível observar que independente do estado físico do ferro gusa, a variação na injeção de oxigênio tem comportamento parabólico, como mostra a figura 5.5.

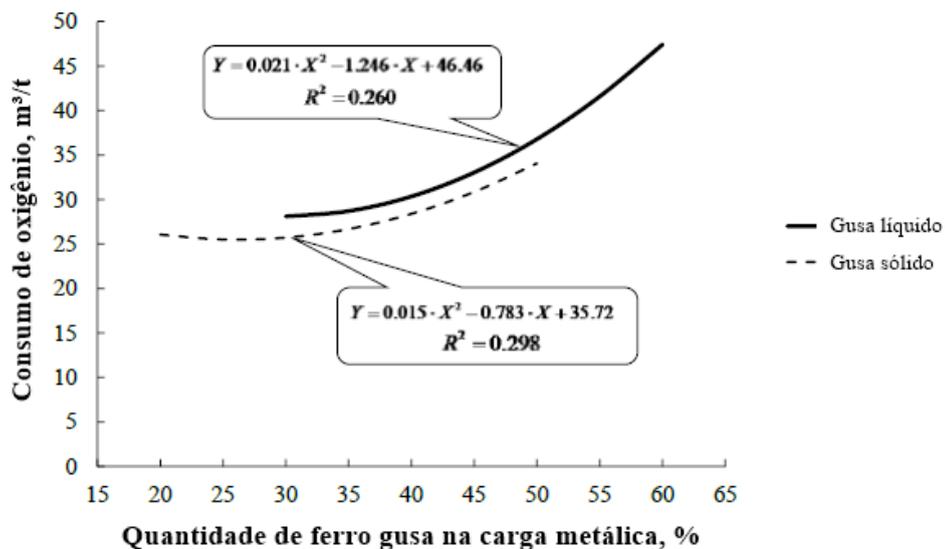


Figura 5.5 - Variação do consumo de oxigênio com o percentual de ferro gusa (Umansky e Dumova, 2018)

A avaliação de custo de produção do aço a partir de diferentes fontes de ferro é um assunto controverso, uma vez que a precificação dos insumos é muito inconstante, os preços tanto da sucata quando do material virgem podem mudar de uma época para outra, fazendo com que a utilização de um material que inicialmente era viável, já não seja mais rentável. Ainda assim, é certo de que a utilização de outros tipos de materiais em substituição a sucata irá aumentar com o decorrer dos anos (GYLLENRAM, WEI, JÖNSSON, 2015).

5.3 Efeito da carga metálica na produtividade

A produtividade é um indicador de grande importância para que a aciaria elétrica seja economicamente viável. Em um forno elétrico a arco a produtividade pode ser dada pela equação 5.5.

$$\text{Produtividade} = (\text{Peso de Vazamento [ton]} / \text{taptotap [min]}) * (60 [\text{min/h}]) [\text{ton/h}]$$

O resultado dessa equação indicará se a produtividade está dentro do planejado, conforme o quadro 1 (GERDAU, 2013b).

Quadro 1 – Classificação da produtividade em um FEA

Baixo desempenho	Produtividade <1
Desempenho normal	$1 \leq \text{Produtividade} < 1,10$
Bom desempenho	$1,10 \leq \text{Produtividade} < 1,35$
Desempenho excepcional	Produtividade $\geq 1,35$

No que diz respeito à produtividade, alguns autores como Vaish, Singh e Gupta (1994) relatam em seus trabalhos perdas em tempo de operação e de aumento de consumo de energia independente do percentual de DRI ou HBI utilizado. Por outro lado, estudos mais aprofundados como o realizado por Hassan, Kotelnikov e Abdelwahed (2021) mostraram que o consumo de energia, o rendimento e a produtividade são os parâmetros mais afetados pela qualidade e o percentual de DRI carregado no FEA em substituição parcial à sucata. Enquanto a utilização de DRI de alta qualidade, em percentuais variando entre 75% e 100% aumenta o rendimento do reator para valores entre 86% e 87,5% e diminui o tap-to-tap, a utilização de 45% de DRI de baixa qualidade reduz o rendimento do FEA para 85%. O autor conclui em seu trabalho que o pico de ganho em produtividade está na utilização de DRI de alta qualidade entre 20% e 50% da composição da carga metálica.

O estudo de Rayhanizadeh e colaboradores (2020) tem pontos em comum com Hassan, Kotelnikov e Abdelwahed (2021). Através de programação linear, Rayhanizadeh e colaboradores, em 2020, concluíram que a mistura ideal para produção de aço via FEA utilizando DRI e sucata é de 20% do primeiro e 80% do segundo, segundo ele esse percentual de DRI é suficiente para diminuir o tempo de fusão da carga metálica, a partir da energia química proveniente da oxidação do carbono presente no DRI, além de fornecer o percentual de carbono necessário para a liga. Rayhanizadeh e colaboradores (2020) concluíram ainda, que a utilização de 100% de DRI não é indicada no FEA, segundo o autor, essa carga aumentara o tap-to-tap, diminuirá a produtividade e aumentara o consumo de energia elétrica, devido ao alto volume de ganga. Hassan, Kotelnikov e Abdelwahed (2021) também relatam ganhos em produtividade decorrentes da menor necessidade de processamento de sucata, uma vez que é requerida uma menor quantidade desse insumo.

Com a utilização de ferro gusa, os ganhos de produtividade são mais expressivos, conforme Wu Du e colaboradores (2006) apresentam em seu estudo, a grande quantidade de energia química fornecida ao processo pelo ferro gusa reduz de forma significativa o tempo de aquecimento e fusão da carga metálica. Em seu estudo, Wu Du et al. (2006) concluíram que a utilização de gusa quente (com temperatura acima de 1200°C) é otimizada quando esse material representa entre 20% e 30% da carga metálica, o autor ainda ressalta a importância de teores de $P < 0,17\%$ e $S < 0,060\%$ além de teores adequados de Si e Mn, uma vez que teores muito alto desses elementos pode ocasionar um aquecimento acelerado da mistura, em função das reações exotérmicas. Temos também, a alta densidade do ferro gusa, vantagem apresentada por França e colaboradores (2012) em seu trabalho, que pode reduzir o número de carregamentos, aumentando ainda mais a produtividade.

Já com carregamento de gusa sólido e frio no FEA Wu Du e colaboradores (2006) concluíram com testes práticos em uma empresa siderúrgica que 35% desse material em um forno de 84t proporciona resultados positivos no tempo de aquecimento da carga e conseqüentemente na produtividade, devido grande parte as reações de oxidação do C, Si, e Mn presentes no gusa.

Por outro lado, Wu Du e colaboradores (2006) ressaltam a importância da utilização de ferro gusa com teores moderados de S e P, uma vez que concentrações elevadas desses elementos presentes no gusa, podem exigir etapas mais longas de dessulfuração e desfosforação, impactando de forma negativa no processo como um todo.

Em seus dados experimentais Vieira (2017) revela um já esperado aumento no rendimento metálico, uma vez que, devido a um desequilíbrio termodinâmico no FEA, o excesso de carbono presente no gusa leva a uma menor concentração de FeO na escória. Por outro lado, o mesmo autor menciona um aumento no volume de escória em função da possível necessidade de adição extra de cal para se alcançar a basicidade adequada da escória, uma vez que um grande volume de SiO₂ proveniente da oxidação do Si presente no gusa deslocará a escória para o lado ácido.

Na comparação direta entre o uso do ferro gusa sólido e o líquido, estudos mostram um ganho de produtividade de 20 toneladas por hora, além ainda de reduções de mais de 20% no consumo de energia elétrica (WANDEKOKEN, 2014). Dessa forma, é provável que a

utilização da rota alto-forno, FEA é economicamente viável na produção de aço, usando um mix de carga virgem e material reciclado.

5.4 Aspectos ambientais

A siderurgia tem impacto significativo nas emissões de gases do efeito estufa, causado principalmente pela rota tradicional, alto-forno, aciaria a oxigênio. Essa rota foi responsável pela emissão de 5% de todo o monóxido de carbono em 2009, 6,7% em 2010 e 10% em 2011, revelando assim um crescente aumento da representatividade no impacto ambiental causado pela siderurgia (LINKE, 2018).

O processo de redução do minério de ferro via alto-forno é responsável pela maior parte das emissões provenientes da siderurgia, dessa forma, a produção de aço a partir de rotas secundárias que utilizam como matéria prima principalmente a sucata de aço representa ganhos significativos principalmente no que diz respeito às emissões de CO₂. (TOP)

Segundo TAHA, IBRAHIM, ALI, 2016A produção de aço via aciaria a oxigênio consome 2,5 vezes mais energia que a aciaria elétrica. Enquanto a produção de aço via FEA consome de 9 GJ/t a 12,5 GJ/t a aciaria a oxigênio consome de 28 GJ/t a 31 GJ/t.

Além disso, enquanto na rota primária de produção de aço, a partir da redução do minério de ferro via alto forno e refino via convertedor LD, são emitidas 2,1t de CO₂ por tonelada de aço produzida. A aciaria elétrica, por sua vez, com a utilização de sucata, leva à emissão de 0,6t de CO₂ por tonelada de aço bruto, o que representa uma redução de aproximadamente 71% das emissões. (BAUM, 2021)

Considerando uma aciaria elétrica operando com uma carga metálica composta por 100% de sucata, para cada tonelada de aço produzido, é deixado de consumir em média 1400kg de minério de ferro, 740kg de carvão, redução e 1,4t de emissões de CO₂ além de uma diminuição no consumo de oxigênio e fundentes (PASSOS, 2009).

Nas últimas décadas a economia mundial tem canalizado energia para que ocorra a minimização das emissões atmosféricas, e na siderurgia não é diferente. A aciaria elétrica é um caminho promissor para o aço verde, aproveitando ao máximo a sucata disponível e alcançando o carbono neutro. Entretanto, existem pontos relevantes que devem ser considerados para que seja realmente alcançada a neutralidade de carbono, sendo o principal deles, a origem da energia elétrica utilizada no processo. Em muitos países a energia elétrica é gerada a partir da queima de combustíveis fósseis. Dessa forma, as emissões não são minimizadas, sendo apenas transferidas da aciaria para a geração de energia. Alguns países da Europa já cobram o chamado “imposto de fronteira” para aços não neutros em carbono comercializados em seus territórios (HITES, 2020)

Tudo isso, aliado à diminuição das reservas de minério de ferro com alto teor, leva à crescente expansão da aciaria elétrica.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado sob a expectativa de mostrar, a partir de dados reais, que diferentes tipos de metálicos carregados no FEA, em percentuais variados, podem influenciar não somente de forma positiva, mas também de forma prejudicial ao processo, o que reforça a importância de uma avaliação criteriosa na seleção dos tipos de materiais que irão compor a carga do reator.

A contaminação da sucata é um problema sério na fabricação de aço, já que a presença de elementos contaminantes pode afetar de forma negativa o processo, tanto no consumo de energia e produtividade, quanto na qualidade do aço produzido. Vários são os contaminantes presentes na sucata, sendo Cu e Sn alguns dos contaminantes mais comuns, elementos esses que em podem gerar problemas como a fragilização e trincas no aço.

Dessa forma, é importante que a sucata seja devidamente classificada antes de ser utilizada na aciaria elétrica. A seleção adequada da sucata permite que apenas o material de qualidade seja utilizado, dessa forma a utilização de materiais virgens como ferro gusa ou ferro esponja sejam reduzidos em menores quantidades, garantindo a qualidade do aço produzido.

É notório que a aciaria elétrica tem grande potencial para se alcançar uma redução significativa no impacto ambiental causado pela siderurgia, tanto no consumo mais sustentável, deixando de consumir até 1,8t de minério de ferro e 0,5t de carvão por tonelada de aço produzido, além ainda da redução de até 1,7t de CO₂ por tonelada de aço bruto nas emissões dos Gases do efeito estufa (GEE), entretanto essa redução está ligada a fatores como a origem da energia elétrica utilizada no processo, além do tipo de insumo utilizado na produção do aço.

O ferro gusa e o ferro esponja são os principais substitutos da sucata na produção de aço via FEA, ambos têm como função principal atuar como diluidores de elementos residuais presentes na sucata.

O gusa sólido reduz o número de carregamentos do FEA, além de fornecer energia química a partir das reações de oxidação do Si e do C, o que leva a uma maior produtividade e um menor consumo de energia elétrica. De forma semelhante, a utilização de 34% a 40% ferro gusa líquido promove melhorias ainda maiores no tap-to-tap e redução no consumo de

energia de até 30%.

Já a utilização dos metálicos da redução direta, apresenta alguns ônus que fazem com que a sua utilização não seja tão vantajosa em determinadas situações. Mesmo possuindo uma química mais controlada, o volume de ganga presente no DRI e no HBI promove um aumento na escória e um atraso no processo de espumação, impactando diretamente na produtividade. Além disso, o grau de metalização do ferro esponja afeta consideravelmente o consumo de energia do FEA, podendo reduzir em até 35kwh/t a cada 1% de aumento no grau de metalização, dessa forma, quanto maior o grau de metalização, caracterizado pelo menor teor de FeO, menor será o consumo de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ABEL, W; HEIN, M. The use of scrap substitutes like cold / hot dri and hot metal in electric steelmaking. **Archives of Metallurgy and Materials**, Russia, v.53, n.2, p. 353-357, 2008.9
- DRESSEL, G. Use of DRI in EAF's. **Materials Science**, USA, S.V., p 1-6, 2010.
- ARAÚJO, D. Desenvolvimento de um modelo computacional de otimização e predição do valor de uso de pelotas de minério de ferro na rota redução direta – aciaria elétrica. José Carlos D'Abreu. 2007. 204p. Tese (Doutorado) - Ciência dos Materiais e Metalurgia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- ASSIS, P. Siderurgia II. 2022. Nota de aula. Não paginado.
- ÁVILA, T. A. Condicionamento de escórias em forno elétrico a arco para otimização das condições de espumação da escória e refino do aço. 2011. 164 folhas. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- BARÃO, C.; MARTINS, M.F.; PEREIRA, L.M.; FERREIRA, D.P; ZAHNER, S.L. Automação do EOF*. In: 50º SEMINÁRIO DE ACIARIA, FUNDIÇÃO E METALURGIA DE NÃO-FERROSOS, 430-411, São Paulo, 2019.
- BAUM, V. B. Análise comparativa dos impactos ambientais associados às rotas primária e secundária da produção de aço em uma usina siderúrgica: estudo de caso baseado na avaliação do ciclo de vida da estrutura metálica de um pavilhão industrial executada a partir de sucata ferrosa reciclada. 2021. 74 folhas. Dissertação (Mestrado em engenharia e tecnologia de materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- BIRAT, J. A future study analysis of the technological evolution of the EAF by 2010. **Revue de Metallurgie**, Paris, v.97, n.11, p. 1347-1363, 2000.
- BUZIN, P. Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico à arco. Ivo André Homrich Schneider. 2009. 138p. Dissertação (mestrado) Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- COSTA, V. L.; ESCORSIM, S.; COSTA, D. L. Processo produtivo e produção de aço: a inserção do Grupo Gerdau S.A. no cenário mundial. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO, Ponta Grossa, 2007.
- ECHTERHOF, M. Review on the use of alternative carbon sources in eaf steelmaking. **Metals**, Alemanha, v.11; n. 222, p. 1-15, 2021.
- FRANÇA, R.C.; SILVA, F.L.; DESTRO, E.; ASSIS, P.S. Otimização da mistura de sucata e outras matérias-primas para composição da carga de forno elétrico a arco. In: 31º SEMINÁRIO DE LOGÍSTICA, 12, 2012. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Belo Horizonte, 2012.
- GERDAU. ACI-513:Processo em forno elétrico a arco. 1. ed. Escola Técnica Gerdau, 2012, 98p.
- GERDAU. AC-216, AC-518: Refratários do FEA. 1. ed. Escola Técnica Gerdau, 2013a, 79p.

GERDAU. AC-216, AC-518: AC-210: Processo FEA - Fusão e Refino. 1. ed. Escola Técnica Gerdau, 2013b, 164p.

GYLLENRAM, R ;WEI, W; JÖNSSON, P. Raw material assessment for electric arc furnace steelmaking. *In: International Congress on the Science and Technology of Steelmaking*, 6, 2015, Beijing.

GOMES, R. Análise energética de um forno elétrico a arco de 40 T utilizando gusa líquido. Márcio Corrêa de Carvalho. 2012. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2012.

GRANT, M; BLOSTEIN, P; BUT, S. Operation of large eafs with the use of different energy resources and raw materials. **Metallurgist**, Nova Iorque, v. 60, n.3, p. 374-379, 2016.

HASSAN, A.; KOTELNIKOV, G.; ABDELWAHED, H. Melting characteristics of alternative charging materials in na electric arc furnace steelmaking. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 48, n. 10, p. 1136–1141, 2021.

HITES, B. The growth of EAF steelmaking. *Recycling today*, Atlanta, abril, 2020. Disponível em <<https://www.recyclingtoday.com/article/the-growth-of-eaf-steelmaking/>>. Acesso em 03/12/2022.

HORNBY, S; Mini-mill burdening for maximum efficiency and yield? **Iron and Steel Technology**, Nova Iorque, v. 4, p. 1-13, 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. A Siderurgia em Números 2020. 2020. 27p. – Pocket Yearbook

– Instituto de Aço Brasil, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em:

<https://institutoacobrasil.net.br/site/wpcontent/uploads/2019/08/AcoBrasil_Mini_anuario_2019.pdf>. Acesso em 13 dez. 2021.

LAURENTI, S.; GOTTARDI, R.; MIANI, S.; PARTYKA, A. High performance single-bucket charging EAF practice. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 32, n. 3, p. 195–198, 2013.

LINKE, P. Controle de Emissões de CO2 na siderurgia: estratégias empresariais da ArcelorMittal Tubarão. **Revista Monografias Ambientais**, São Paulo v.16, n., p. 52–67, 2018.

MAPELLI, C.; BARAGIOLA, S. Evaluation of energy and exergy performances in EAF during melting and refining period. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 33, n. 5, p. 379– 388, 2006.

MELLO, Á. 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, 31-51, São Paulo, 2008.

MEMOLI, F; FERRI, M; FREITAS, J. Aumento das plantas Consteel no mundo: flexibilidade para carga contínua de gusa líquido e sucata no forno elétrico a arco agora na siderurgia brasileira. **Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração**, São Paulo, v. 6, n.1, p. 64-60, 2016.

MIRANDA, A. M. Monitoramento dos elementos residuais menos comuns no fornecimento de sucata para aciaria FEA. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

MIRANDA, A.; ASSIS, P.; BROOKS, J.; RHAMDHANI, M.; FONTANA, A.; KING, A.;

SANDERS, G.; MOREIRA, G. Monitoring of less-common residual elements in scrap feeds for EAF steelmaking. **Ironmaking and Steelmaking**. Ouro Preto, DOI: 10.1080/03019233.2019.1601851, 2019.

PASSOS, E. K. D. Avaliação das Rotas Alternativas de Produção de Ferro Gusa. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PAULINO, M; KLUG, J; BIELEFEDT, W; VILELA, A; HECK, N. Obtenção de escória

espumante em forno elétrico a arco: determinação das composições para o sistema CaO-SiO₂-MgO-FeO. *In*: Seminário de Aciaria – Internacional, 45, 2014, Porto Alegre.

RAYHANIZADEH, A; TOWHIDI, N; EBRAHIMNEJAD, S; SHAJARI, Y. A fuzzy approach to selecting the electric arc furnace metallic charge materials. **Engineering Research Express**, Iran, v.2, p. 1-10, 2020.

RIZZO, E. M. DA S. Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco. 1ª edição. São Paulo: Blucher, 2006. 102p.

RHODE, L.; NUNES, W.P.; CERATTI, J. A. P. Escória de aciaria elétrica: uma alternativa aos materiais granulares tradicionais. **Transportes**. v. 1, n. 1, p. 13-17, 2002.

SALLES, S. Estudo de viabilidade técnica e econômica do refino primário para uma mini-aciaria de 150.000 toneladas. Paulo Santos Assis. 2016. 149p. Dissertação (Mestrado) - Rede Temática em Engenharia de Materiais. Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Processos de Fabricação. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SANDBERG, E. Energy and Scrap Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Analysis of Process Data. 2005. 80p. Licenciate Thesis. Department of Chemical Engineering and Geosciences, Division of Process Metallurgy. Luleå University of Technology, Norrbotten, 2005.

SILVA, A.; MEI, P. R. Aços e ligas especiais. 3ª edição. São Paulo: Blucher, 2010. 664p.

SPOONER, S.; DAVIS, C.; LI, Z. Modelling the cumulative effect of scrap usage within a circular UK steel industry–residual element aggregation. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 47, n. 10, p. 1100–1113, 2020.

STUBBLES, J. R. The minimill story. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 40, n. 2, p. 134–144, 2009.

TAHA, S; IBRAHIM, M; ALI, A. Steel as a sustainable choice towards the green building concept. **Sustainable Development and Planning**. v. 210, p 123-134, 2016.

UMANSKY, A; DUMOVA, L. A study on the influence of the ratio of pig iron and metal scrap in the of electric melting charge on the technical and economic performances of the rail steel production. **Materials Science and Engineering**, Rússia, v. 411, p1-7, 2018.

VAISH, A; SINGH, S; GUFTA, K. Potentialities of alternative Charge materials for the electric arc furnace. **National MetallurgicalLaboratory**, Jamshedpur, s.v., p. 97-105, 1994.

VIEIRA, D. Análise comparativa da composição química de aço e escória e rendimento metálico de um fea entre parâmetros de carregamento e injeções distintos. Wagner Viana Bielefeldt. 2017. 158p. Dissertação (mestrado)- Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa. Universidade Federal do Rio Grande do Sul,Porto Alegre, 2017.

WU DU, C; YONG ZHU, M; SUN, L; DONG, S. Metallurgical Characteristics and Effectiveness of Metallic Charges in Electric Arc Furnace. **Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing**. China, v.14, n.3, 353-362, 2006.