

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

TACIO TEIXEIRA LOPEZ TORRES

ELABORAÇÃO DE UM MOSTRUÁRIO DE FERROLIGAS E
REVISÃO SOBRE O PROCESSO
DE FABRICAÇÃO DO AÇO

SÃO CARLOS

2023

TACIO TEIXEIRA LOPEZ TORRES

**ELABORAÇÃO DE UM MOSTRUÁRIO DE FERROLIGAS E
REVISÃO SOBRE O PROCESSO
DE FABRICAÇÃO DO AÇO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Benedito Marcomini

SÃO CARLOS

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE
ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

T693e Torres, Tacio Teixeira Lopez
 ELABORAÇÃO DE UM MOSTRUÁRIO DE FERRO-LIGAS E
REVISÃO SOBRE O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO / Tacio
Teixeira Lopez Torres; orientador José Benedito
Marcomini. São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais
e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2023.

1. FERROLIGA. 2. AÇO. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato / Student: Tacio Teixeira Lopez Torres
Título do TCC / Title: ELABORAÇÃO DE UM MOSTRUÁRIO DE FERRO-LIGAS E REVISÃO SOBRE O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO
Data de defesa / Date: 13/07/2023

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / Result
Professor José Benedito Marcomini (orientador)	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Doutor Jonas de Carvalho	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SEM	
Doutor Maíra Martins da Silva	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SEM	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee



Professor José Benedito Marcomini

DEDICATÓRIA

À minha família e namorada pelo apoio prestado, aos meus colegas da materiais e da República A casa lar sempre presentes nas alegrias e dificuldades da vida, à Deus pela dádiva do momento pelo qual estou passando e aos meus professores orientadores que se empenharam para que eu pudesse estar me tornando o profissional que almejo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força para perseverar neste aprendizado e na transformação do profissional que almejo ser.

A esta instituição de ensino ao qual me deu a oportunidade de formação no curso que escolhi.

A todos os meus professores que cumpriram com maestria o seu papel na arte de ensinar e a lapidar o diamante interno de cada aluno para se tornarem profissionais competentes e capacitados no futuro.

A minha família e minha namorada que estiveram comigo durante todo o caminho, a minha família da República A casa Lar pelo apoio prestado nos bons e maus momentos, na alegria de nossas reuniões fora das salas de aula e pelas amizades que eu sei que levarei para a vida.

A empresa Gerdau que forneceu as peças ao professor Marcomini.

EPÍGRAFE

"É ótimo celebrar o sucesso, mas mais importante ainda é assimilar as lições trazidas pelos erros que cometemos". - Bill Gates

RESUMO

TORRES, T. Elaboração de um mostruário de ferroligas e revisão sobre o processo de fabricação do aço, 2023. 198 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

As ferroligas desempenham um papel fundamental na indústria metalúrgica, sendo constituídas por ligas de ferro combinadas com diversos elementos químicos, como manganês, silício, cromo e níquel. Essas ligas são amplamente empregadas no processo de fabricação do aço, para conferir propriedades específicas, desempenhando um papel crucial na produção de aço inoxidável, aço utilizado na indústria aeronáutica e outros tipos de aços especiais. Essas ligas de ferro constituem o meio pelo qual os elementos de liga são adicionados aos aços para conferir propriedades como resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga, resistência em altas temperaturas e outras. No presente trabalho, foi construído um mostruário com 15 amostras de ferroligas e foi elaborada uma revisão da literatura sobre o processo de fabricação do aço, demonstrando a utilização de ferroligas e incluindo a tendência atual do uso do hidrogênio como forma de redução da utilização do carbono mineral ou vegetal, nesse processo, com o intuito de reduzir as emissões de gases nocivos ao meio ambiente. A ideia é que o mostruário fique exposto em ponto estratégico do departamento, para facilitar o aprendizado dos estudantes de Engenharia de Materiais. Neste trabalho, também é destacada a importância do mostruário para o aprendizado.

Palavras-chave: Ferroliga. Indústria. Produto. Composição.

ABSTRACT

TORRES, T. Elaboration of a showcase of ferroalloys and review of the steel manufacturing process, 2023. 198 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023

Ferroalloys perform a key role in the metallurgical industry, consisting of iron alloys combined with various chemical elements, such as manganese, silicon, chromium and nickel. These alloys are widely used in the steel manufacturing process to provide specific properties, playing a crucial role in the production of stainless steel, steel used in the aeronautical industry and other types of special steels. These iron alloys consist of the way by which alloying elements are added to steels to provide properties such as mechanical strength, ductility, tenacity, resistance to fatigue, resistance to high temperatures and other properties. In the present work, a showcase was built with 15 samples of ferroalloys and a review of the literature on the steel manufacturing process was carried out, demonstrating the use of ferroalloys and including the current trend in the use of hydrogen as a way to reduce the use of mineral or vegetable carbon in this process, with the aim of reducing the emission of harmful gases to the environment. The idea is that the showcase be displayed at a strategic point in the department, to facilitate the learning of Materials Engineering's students. In this work, the importance of the showcase for learning is also highlighted.

Keywords: Ferroalloys. Industry. Product. Composition.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fluxograma de produção de aço com as diversas alternativas de processo para cada etapa. Naturalmente, nem todas as usinas têm todos os equipamentos listados.	Pág 11
Figura 2	Fluxograma forno panela para adição de ferroligas	Pág 14
Figura 3	Emissão específica de CO ₂ referente à parcela de DRI e sucata (%REC: % de sucata reciclada)	Pág 25
Figura 4	Amostra FeMnBC	Pág 33
Figura 5	Amostra FeMnAC	Pág 34
Figura 6	Amostra FeV	Pág 35
Figura 7	Amostra FeSiMn	Pág 37
Figura 8	Amostra FeNb	Pág 39
Figura 9	Amostra FeMnMC Nit	Pág 40
Figura 10	FeCrBC	Pág 42
Figura 11	FeCrAC	Pág 42
Figura 12	FeMo	Pág 43
Figura 13	FeTi	Pág 44
Figura 14	FeP	Pág 46
Figura 15	FeB	Pág 47
Figura 16	FeSi 75%	Pág 49
Figura 17	Níquel Eletrolítico	Pág 50
Figura 18	Caixa de Amostra	Pág 51
Figura 19	Caixa de Amostra pronta	Pág 52

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 -	Tipos de Ferroligas Comerciais	Pág 18
Tabela 2 -	Exemplo de Parâmetros de Fusão de SiMn	Pág 56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FeMn BC	Ferro Manganês Baixo Carbono
FeNb	Ferro Nióbio Alto Carbono
FeSiMn	Ferro Silício Manganês
FeNb	Ferro Nióbio
FeMn Mc Nit	Ferro Manganês Médio Carbono Nitrogenado
FeCr AC	Ferro Cromo alto carbono
FeCr BC	Ferro Cromo Baixo Carbono
FeMo	Ferro Molibdênio
FeTi	Ferro Titanium
FeB	Ferro Boro
FeSi 75%	Ferro Sílício 75%
FeP	Ferro Fósforo
FeV	Ferro Vanádio
BF	Alto Forno
BOF	Aciaria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 PROCESSO FABRICAÇÃO DO AÇO	11
2.1 ALTO FORNO	11
2.2 ACIARIA - REFINO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO	12
• ADITIVAÇÃO: ETAPA DE ADIÇÃO DAS FERROLIGAS	13
• PRINCIPAIS DIFICULDADES DA ADITIVAÇÃO DE FERROLIGAS	15
I. HETEROGENEIZAÇÃO	15
II. REATIVIDADE.....	15
III. CONTROLE DOS ELEMENTOS DE LIGA	15
• MERCADO INTERNACIONAL DAS FERROLIGAS.....	16
2.3 LINGOTAMENTO E CONFORMAÇÃO	16
3 PRODUÇÃO DAS FERROLIGAS	17
4 DESCARBONIZAÇÃO E INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO NAS INDÚSTRIAS SIDERÚRGICAS: DESENVOLVIMENTO RECENTE, DESAFIOS E ANÁLISE TECNO ECONÔMICA.....	20
4.1 PRINCIPAIS OPÇÕES DE TECNOLOGIA À BASE DE CARVÃO / COQUE	21
• DESCARBONIZAÇÃO DA ROTA BF-BOF DE TECNOLOGIA CONVENCIONAL	21
• TECNORED	22
• MÉTODO HISARNA	22
• COREX	23
• PROCESSO FINEX	23
• CIRCOFER E MXCOL	23
4.2 OPÇÕES BASEADAS EM GÁS PARA INTEGRAÇÃO COM HIDROGÊNIO: REDUÇÃO DIRETA DE FERRO E FORNO A ARCO ELÉTRICO	24
• PROCESSO DE FORNO DE EIXO MIDREX	25
• PROCESSO DE REDUÇÃO DIRETA HYL / ENERGIRON	26
• HÍBRIDO	27

• CIRCUNDADO	27
• PROCESSO FINMET	27
4.3 Fabricação de ferro e aço à base de plasma e eletrólise: redução de fusão de plasma de hidrogênio	28
• ELETRÓLISE ALCALINA DE FERRO.....	28
• ELETRÓLISE DE ÓXIDO FUNDIDO	29
4.4 DESAFIOS DA INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO NAS INDÚSTRIAS SIDERÚRGICAS	29
4.5 COMPARAÇÃO TECNO ECONÔMICA E NÍVEL DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA.....	30
5 FERROLIGAS E NÍQUEL ELETROLÍTICO	32
5.1 FeMnBC – FERRO MANGANÊS BAIXO CARBONO	32
5. 2 FeMnAC – FERRO MANGANÊS ALTO CARBONO	33
5. 3 FeV – FERRO VANÁDIO.....	34
5.4 FeSiMn – FERRO SILÍCIO MANGANÊS	35
5.5 FeNb – FERRO NIÓBIO	37
5.6 FeMnMC Nit – FERROLIGA DE FERRO MANGANÊS MEDIO CARBONO	39
5.7 FeCrAC – FERRO CROMO ALTO CARBONO E FeCrBC – FERRO CROMO BAIXO CARBONO.....	40
5. 8 FeMo – FERRO MOLIBDÊNIO	42
5. 9 FeTi – FERRO TITÂNIO	44
5. 10 FeP – FERRO FÓSFORO	45
5. 11 FeB – FERRO BORO.....	46
5. 12 FeSi 75% - FERRO SILÍCIO 75%	47
5.13 NÍQUEL ELETROLÍTICO	49
6.MOSTRUÁRIO: MONTAGEM E EXIBIÇÃO	51
6.1 MONTAGEM	51
6.2 FOLHA DE CONSULTA	54
7. CONCLUSÃO	55

8. REFERÊNCIAS	57
----------------------	----

1 INTRODUÇÃO

As ligas de ferro desempenham uma função fundamental na indústria metalúrgica, sendo constituídas por ligas de ferro combinadas com diversos elementos químicos como manganês, silício, cromo e níquel. Essas ligas são amplamente utilizadas na fabricação de aço como forma de adicionar elementos aos aços que irão conferir propriedades especiais aos materiais e desempenham uma função fundamental na produção de aços inoxidáveis, aços aeroespaciais e outros aços especiais. Na maioria de suas aplicações, as ferroligas que contribuem para a melhoria da qualidade dos produtos siderúrgicos, onde seus elementos proporcionam características específicas aos materiais, como dureza, ductilidade e resistência à corrosão, tornando-os essenciais na produção no cenário atual, de carências cada vez mais específicas (GASIK, 2013).

Em especial, as ferroligas de manganês e silício apresentam aplicações versáteis na fabricação de diversos tipos de aços e fundidos de ferro. Além de atuarem como agentes dessulfurantes e desoxidantes, essas ligas são conhecidas por melhorar a maleabilidade, tenacidade e dureza do aço (GASIK, 2013).

As ferroligas de silício proporcionam ao aço aplicações além das propriedades gerais, sendo utilizadas nas indústrias química, eletrônica e de metalurgia de não-ferrosos (GASIK, 2013). Por outro lado, as ligas de níquel e cromo desempenham um papel significativo na produção de aço inoxidável, conferindo-lhe resistência à corrosão e propriedades mecânicas superiores (GASIK, 2013). Além das ferroligas mais comuns, existem as chamadas ferroligas especiais, como ferrotitânio, ferrotungstênio, ferronióbio e ferrovanádio, que têm um papel relevante na composição de aços especiais. O ferrotitânio, em particular, recebe grandes investimentos na produção de aço para a indústria aeronáutica devido à sua combinação única de resistência e leveza. A quantidade de produção de ferro ligas está diretamente ligada ao mercado de aço, e podemos provar esse ponto comparando a evolução do mercado de Aço e ferroligas de 1990 a 2010, nesse período tivemos o mercado de Aço aumentando de 770 para 1400 milhões de toneladas e da mesma forma tivemos o mercado de ferro liga praticamente dobrando saindo de 20 para 45 milhões (ANDRADE et al., 1999; GASIK, 2013).

No entanto, a obtenção de dados estatísticos agregados e atualizados sobre o mercado de ferroligas é uma tarefa desafiadora, que dificultam entender as principais dificuldades para a produção e consumo dessas ligas.

Isso ocorre devido à falta de uma entidade internacional centralizadora de informações e à demora na divulgação de dados pelos principais países envolvidos nesse mercado (ANDRADE et al., 1999). Para superar essa limitação, os analistas recorrem a diversas fontes de informação, como o United States Geological Survey (USGS) e organizações nacionais, incluindo Abrafe, Secex, empresas do setor, periódicos e revistas especializadas (ANDRADE et al., 1999).

No contexto internacional, as análises do mercado de ferroligas contam com tabelas que apresentam dados parcialmente estimados e divulgados pelo USGS em 1998, referentes à produção ocorrida em 1997 (ANDRADE et al., 1999). Por outro lado, no âmbito nacional, é possível obter dados mais atualizados por meio de fontes como Abrafe, Secex, empresas do setor, periódicos e revistas especializadas, que incluem estatísticas referentes ao ano de 1998 (ANDRADE et al., 1999).

Apesar dos desafios enfrentados na obtenção de dados, a análise do mercado de ferroligas é essencial para compreender a evolução e as tendências desse setor. O conhecimento atualizado sobre a produção e utilização dessas ligas contribui para a formulação de estratégias eficazes na indústria metalúrgica, aprimorando a qualidade dos produtos siderúrgicos. (ANDRADE et al., 1999).

As ferroligas são uma das formas mais utilizadas mundialmente de se alterar propriedade dos aços, a intenção do produto em si é ser absorvida durante o processo de fundição para que o elemento constituinte (Mn, Nb, Si,...) possa ser associado ao aço, gerando uma liga com as propriedades pré definidas. Dessa forma são várias as variáveis de utilização de que devem ser levadas em conta, como armazenamento, quantidade e quando adicionar as ferroligas na produção de aço. (ANDRADE et al., 1999).

Alinhando os objetivos desse trabalho temos 4 principais frentes, que são: Entender o que são ferroligas, revisão sobre o processo de fabricação do aço, desafios ambientais e por fim a construção de uma caixa de amostras. É muito importante o trabalho trazer aos leitores uma revisão clara, precisa e direta sobre o processo de fabricação do aço e fornecer maior contextualização sobre esse processo em relação a utilização de ferroligas, de forma que seja possível entender melhor não só as funções e propriedades das ferroligas no aço mas como e quando são incorporadas e quais as principais dificuldades.

Esse entendimento do processo em suas etapas é fundamental para identificar um dos principais desafios da indústria siderúrgica que é a contenção de emissão de gases que contribuem ao efeito estufa e gasto de energia, desafio que vem sendo pensado e trabalhado em dife-

rentes partes do mundo e que são contextualizados nesse trabalho. Por fim e não menos importante o objetivo final é criar uma forma palpável de aprendizado, de forma que os futuros engenheiros e especialistas do departamento de Materiais e Manufatura e de toda a Universidade de Paulo que estiverem nas mediações do departamento, possam ter um contato com essas amostras e que elas possam despertar curiosidades e muitas vezes trazer novos conhecimentos. Portanto o objetivo desse trabalho resulta em um objetivo final que é a construção de uma caixa de amostras com ferroligas, mas passa por toda uma contextualização e explicação que é fundamental para esse objetivo final.

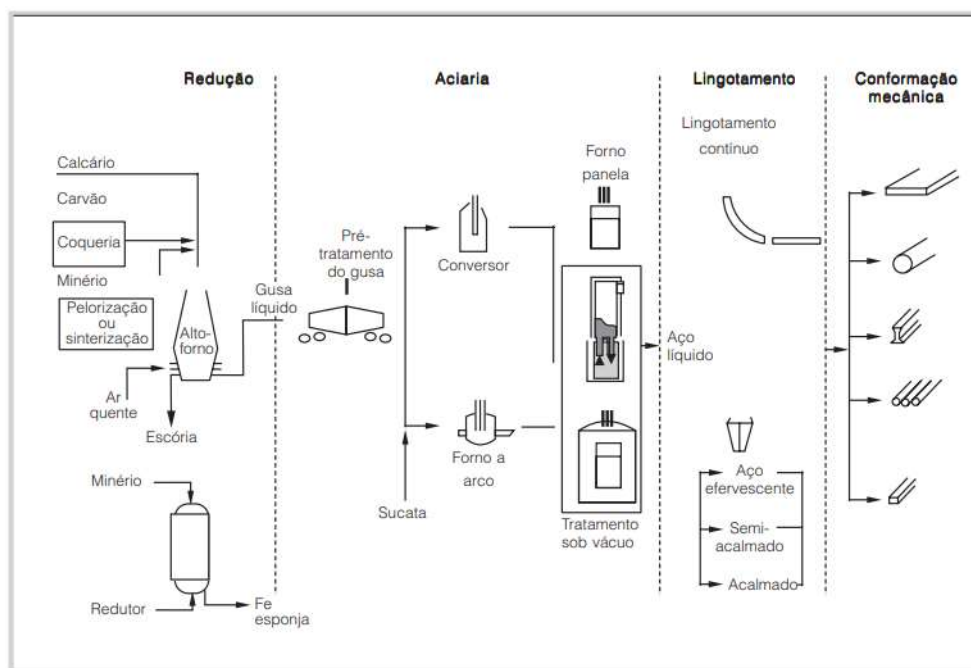
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO FABRICAÇÃO DO AÇO

Entre as matérias primas necessárias para produção do aço o mais importante é o minério de ferro. Na natureza podemos encontrá-los em várias formas diferentes, porém para a produção de aço os minerais que são formados por óxidos são os mais utilizados: Magnetita (Fe_3O_4) e Hematita (Fe_2O_3). (SILVA E MEI, 2006)

O processo de Fabricação do Aço é um processo centenário que vem se aprimorando com o passar do tempo e que é dividido em várias partes como podemos ver na FIGURA 1:

Figura 1 :Fluxograma de produção de aço com as diversas alternativas de processo para cada etapa. Naturalmente, nem todas as usinas têm todos os equipamentos listados.



Fonte: Aços e Ligas especiais, 2006

2.1 ALTO FORNO

O alto-forno é uma instalação utilizada na produção de ferro-gusa a partir do minério de ferro. Esse processo envolve uma série de estágios distintos que ocorrem dentro do alto-forno. (DUTTA e CHOKSHI, 2020)

No contexto do alto-forno, o minério de ferro é combinado com coque (um combustível derivado do carvão) e fundente, frequentemente calcário. O propósito fundamental dessa operação é elevar a temperatura da mistura a níveis extremamente elevados, geralmente em torno de 2.000°C. Esse estágio é conhecido como fusão. (DUTTA e CHOKSHI, 2020)

Durante a fusão, o coque é submetido à queima, resultando na geração de calor intenso e produção de monóxido de carbono (CO). O monóxido de carbono reage com o minério de ferro, provocando a redução do óxido de ferro presente no minério e sua conversão em ferro metálico. Esse processo químico é conhecido como redução. Após a redução o aço se transforma em uma massa porosa chamada ferro-esponja, esse processo também se beneficia da carbonetação do ferro produzido formando uma fração de Fe_3C . (SILVA E MEI, 2006)

Enquanto ocorre a redução do minério de ferro, o calcário exerce a função de fundente, auxiliando na formação da escória. A escória, constituída principalmente por silicatos, é uma substância líquida que é periodicamente removida do alto-forno. (SILVA E MEI, 2006)

Ao término do processo no alto-forno, o ferro metálico reduzido e a escória são separados. O ferro-gusa líquido, composto principalmente por ferro e carbono, se acumula na parte inferior do alto-forno e é coletado para posterior utilização em processos de fabricação de aço. (SILVA E MEI, 2006)

Em resumo, o alto-forno é a estrutura onde ocorre a fusão do minério de ferro com coque e fundente, resultando na redução do óxido de ferro e formação do ferro-gusa líquido. A redução é o processo químico pelo qual ocorre a transformação do óxido de ferro em ferro metálico, enquanto o alto-forno é a instalação física onde essa redução e outras etapas acontecem simultaneamente. (SILVA E MEI, 2006)

2.2 ACIARIA - REFINO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

O refino primário ocorre imediatamente após a obtenção do ferro gusa no alto-forno. Nessa fase, o foco principal é eliminar impurezas e gases indesejáveis presentes no ferro fundido. Isso é realizado por meio de processos de degaseificação, nos quais gases desoxidantes são introduzidos para remover o carbono e hidrogênio dissolvidos. Além disso, ocorre a reação com fundentes, como o calcário, para eliminar impurezas como enxofre e fósforo. A remoção da escória formada durante a reação também é uma parte essencial do refino primário. O resultado é a obtenção de um aço de qualidade aprimorada, com menor teor de impurezas. (SILVA E MEI, 2006)

Já o refino secundário é uma etapa adicional que acontece após o refino primário. Nessa fase, o aço líquido passa por processos adicionais para ajustar sua composição química e melhorar suas propriedades. O refino secundário envolve técnicas de degaseificação, desoxidação, dessulfuração, desfosforação, e algumas técnicas são aplicadas após a solidificação do lingote, como refusão sob escória eletro condutora, refusão a arco sob vácuo e refino por feixe de elétrons. O objetivo principal é aprimorar características específicas do aço, como resistência, ductilidade, tenacidade e controlar inclusões não metálicas. Também é possível realizar ajustes na composição química do aço para atender a requisitos específicos de aplicação. (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d)

Em resumo, o refino primário concentra-se na remoção de impurezas e gases indesejáveis presentes no ferro fundido, enquanto o refino secundário visa ajustar a composição química e aprimorar as propriedades do aço. O refino primário é responsável por obter um aço com menor teor de impurezas, enquanto o refino secundário tem o objetivo de melhorar o aço para atender às exigências específicas de aplicação. Ambos os estágios desempenham papéis fundamentais no processo de fabricação de aço de alta qualidade. (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d).

• **ADITIVAÇÃO: ETAPA DE ADIÇÃO DAS FERROLIGAS**

A aditivação é uma etapa crucial na produção do aço, e na qual ferroligas são adicionadas ao aço líquido para promover alterações e aprimoramentos em suas propriedades. Normalmente, a aditivação ocorre após o refino secundário, quando o aço líquido está em condições adequadas para receber as ferroligas. Existem diferentes métodos de aditivação, incluindo o despejo direto e a injeção. (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d).

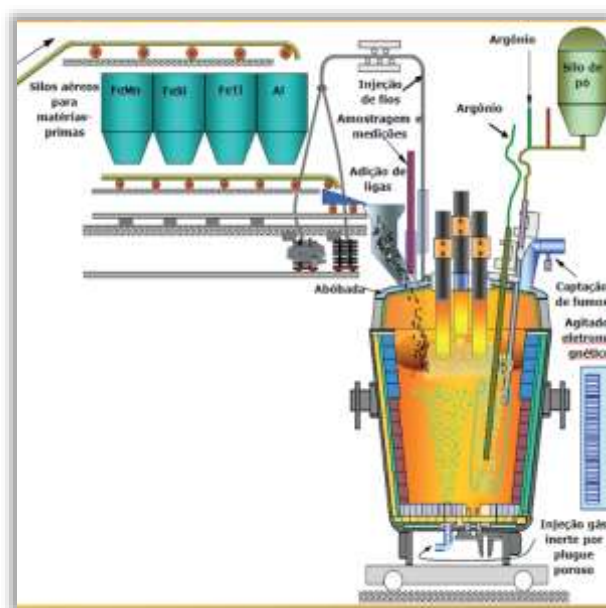
No despejo direto, as ferroligas são adicionadas diretamente ao banho de aço líquido, podendo ser apresentadas na forma de grãos, blocos ou até pó. Isso permite que as ferroligas se dissolvam no aço, ocasionando modificações em suas propriedades. (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d).

Por outro lado, na injeção, as ferroligas são injetadas no aço líquido por meio de dispositivos especiais, como lanças ou tubos. Esse método proporciona um controle mais preciso e

uniforme na incorporação das ferroligas, garantindo uma distribuição homogênea dos elementos de liga no aço. (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d).

Em ambos os tipos de injeção o processo normalmente é feito no forno panela, que é um forno aquecido por eletrodos, normalmente de grafite, que formam um arco elétrico que mantém o aço fundido na temperatura ideal para adição dos aditivos. Na adição por despejos normalmente temos silos com as ferroligas que são adicionados diretamente por um funil como na figura 2, no caso de adição por injeção são usados tubos como também podemos ver na figura.

Figura 2 :Fluxograma forno panela para adição de ferroligas



Fonte: Artigo: Forno Panela | edilsonalvesmaranhao

Assim como comentado anteriormente as ferroligas adicionadas durante esse processo são capazes de aprimorar características como resistência mecânica, resistência à corrosão, dureza e tenacidade. A seleção do momento e do método de aditivação depende da composição química desejada e das propriedades requeridas para o aço final, assegurando que ele atenda aos padrões e especificações necessários para suas aplicações industriais. (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d).

• PRINCIPAIS DIFICULDADES DA ADITIVAÇÃO DE FERROLIGAS

Durante a etapa de aditivação das ferro ligas durante o refino secundário temos a o aço na temperatura ideal para adição das ferroligas, porém algumas dificuldades podem ser encontradas durante o processo.

I. HETEROGENEIZAÇÃO

Uma das possíveis dificuldade é a heterogeneização, ou dificuldade de obter uma distribuição uniforme dos elementos durante a adição dos ferroligas, isso pode gerar ligas com propriedades não uniformes e que podem não servir para os propósitos que foram criadas. Algumas das ações para evitar este problema é um pré-processamento da ferroligas para maior granulação e melhor dissolução, controlar a temperatura de forma eficiente e garantir um bom método de agitação (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d), (DUTTA e CHOKSHI, 2020).

II. REATIVIDADE

Algumas ferroligas podem reagir de forma indesejada com o ambiente do alto-forno ou com os componentes presentes no aço líquido, resultando em perdas de elementos de liga ou na formação de óxidos. A oxidação das ferroligas também pode levar a problemas de qualidade e redução da eficiência da aditivação. Formas de evitar esse problema é utilizar ferroligas menos reativas, manusear as ferroligas de forma cuidadosa para evitar umidade e controlar a atmosfera eficientemente (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d), (DUTTA e CHOKSHI, 2020).

III. CONTROLE DOS ELEMENTOS DE LIGA

Escolher adequadamente as ferroligas e a dosagem correta dos elementos de liga são essenciais para atingir as propriedades desejadas no aço final, por isso é fundamental o conhecimento e estudo do material utilizado, para entender as propriedades que desejadas e assim estabelecer processos de controles de dosagem específicos e calibrados. Um ponto de

atenção nesse caso é garantir bons fornecedores para que as composições químicas do ferroligas sejam conhecidas e bem mapeadas (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d), (DUTTA e CHOKSHI, 2020).

- **MERCADO INTERNACIONAL DAS FERROLIGAS**

De acordo com a associação mundial do aço, aproximadamente 1,9 bilhões de toneladas de aço bruto foram produzidas no mundo em 2020 (BASSON, 2022), e como já dito anteriormente no texto, a produção de ferroligas tem relação direta com produção de aço, especialmente com a produção de aços especiais. Cerca de 85% da produção de ferroligas no mundo são utilizados por siderúrgicas, os outros 15% são utilizados nas indústrias metalúrgicas, eletrônicas e químicas. (ANDRADE et al., 1999; ROZHIKHINA et al., 2020;).

2.3 LINGOTAMENTO E CONFORMAÇÃO

Após a conclusão do processo de refino secundário na aciaria, o aço líquido que passou por ajustes na composição química e aprimoramento das propriedades está pronto para o processo de lingotamento. (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d), (DUTTA e CHOKSHI, 2020).

Normalmente há dois tipos de Lingotamento: Continuo e Convencional. O lingotamento convencional é um método tradicional de produção de lingotes de aço. Nesse processo, o aço líquido é despejado em moldes individuais para formar lingotes sólidos. No lingotamento contínuo, o processo de produção de lingotes é realizado de forma contínua, sem interrupção. O aço líquido é despejado em um molde contínuo composto por uma série de rolos resfriados. Por fim após a produção dos lingotes eles são enviados para diferentes tipos de indústrias para diversos tipos de materiais finais. (SILVA E MEI, 2006); (“Aciaria: Obtenção do Aço Líquido”, s.d), (DUTTA e CHOKSHI, 2020).

3 PRODUÇÃO DAS FERROLIGAS

De acordo com a definição do Bureau de Minas dos Estados Unidos, uma ferroliga é caracterizada como uma liga de ferro contendo, no mínimo, um elemento adicional. Os elementos mais convencionalmente utilizados nas ferroligas incluem manganês, silício, cromo, cálcio, alumínio, bário, estrôncio, magnésio, titânio, vanádio, tungstênio, molibdênio, nióbio, elementos das terras raras (incluindo metais do grupo Y, La e La), tântalo, zircônio, níquel e boro, essas ligas estão condensadas na Tabela 1 para melhor visualização. Em menor proporção, outras ferroligas podem ser produzidas para atender a aplicações específicas. Por outro lado, impurezas como enxofre, fósforo, cobre, estanho, antimônio, bismuto, arsênio, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio são consideradas prejudiciais, tanto para a própria ferroliga quanto para o aço no qual a ferroliga será utilizada (GASIK, 2013).

Tabela 1 : Tipos de Ferroligas Comerciais

	Elemento(s) Principal(ais)	Produtos Principais
Ferroligas "a granel"		
FeSi, Si	Si	Ferrosilício (todos os graus), silício cristalino
FeMn, SiMn, Mn	Mn, Mn ^o Si, Mn ^o N	Ferromanganês de alto, médio e baixo teor de carbono, silício manganês, manganês metálico, nitretado manganês, manganês, ligas mestras
FeCr, FeSiCr	Cr, Cr ^o Si, Cr ^o N	Ferrocromo de alto, médio, baixo e ultrabaixo carbono, cromo de carga, ferrosilicocromo, metal de cromo, ferrocromo nitretado e ligas principais
Ferroligas "Menores"		
Alguns	C	ferrotungstênio
FeMo	mo	ferromolibdênio
FeV	V	Ferrovanádio
Fe(Si)Ca, FeSi(Ba,Mg,Sr)	(Ca,Ba,Sr,Mg) ^o Si	Silicocalcô (silício de cálcio), silicobário, silicomagnésio, silicostrôncio, ligas complexas (Fe-Si-Mg-Ca; Si-Ca-Ba-Fe; Si-Ba-Sr e outros)
FeNb	Nb, Nb ^o Ta	Ferronióbio, Ni-Nb, Nb-Ta-Fe; Nb-Ta-Al-Mn-Si-Ti; Nb-Ta-Al
FeTi	ti	Ferrotitânio, Fe-Si-Ti, Ti-Cr-Al, Ti-Al-Cr-Fe, Ti-Ni
FeB, FeBAI	B, B ^o al	Ferrobório, ferrobório e ligas com boro (Ni-B, Cr-V, greynal)
FeAl, FeSiAl	Al, Al ^o Si	Silico-alumínio, ferro-alumínio, ferrosilicoalumínio, Fe-Al-Mn-Si, Fe-Mn-Al
FeSi-REM	Metais de terras raras (soma do REM)	REM-Si; REM-Si-Fe, REM-Al-Si
FeSiZr, FeAlZr	Zr	Ferrosilício-zircônio, ferroalumínio-zircônio
FeNi, FeCo	Ni, Co, Ni ^o companhia	Ferroniquel, ferrocobalto

Fonte: Livro Handbook Ferroalloys, Michael M. Gasik Editor Aalto, 2013

A qualidade das ferroligas abrange uma série de parâmetros, que vão além da variação na composição química e no tamanho dos grãos, como por exemplo são aspectos considerados a densidade, condições da superfície, inclusões não metálicas e de escória, como gases oxigênio e hidrogênio. O indicador principal da qualidade de uma ferroliga é a sua composição química, especialmente o teor do elemento predominante. É fundamental manter uma consistência nas

quantidades dos elementos de liga em cada produção, permitindo a fabricação de produtos padronizados (GASIK, 2013).

Além disso, a distribuição de tamanho dos grãos é um fator crucial. Se os grãos forem excessivamente grandes, pode haver dificuldades na sua dissolução no aço líquido, enquanto partículas muito finas podem oxidar antes de exercer sua função principal. Adicionalmente, pós finos podem apresentar riscos de incêndio ou formação de fumaça, acarretando perdas nas ferroligas. (GASIK, 2013).

As propriedades mecânicas também são relevantes, pois influenciam a seleção do equipamento de britagem para produzir ligas com granulometria pré-definida. É importante ressaltar que a qualidade das ferroligas está diretamente relacionada à viabilidade técnica, econômica e à eficácia da tecnologia empregada em sua produção. A presença significativa de ferro nas ligas permite a dissolução do elemento predominante, reduzindo sua atividade, diminuindo o ponto de fusão e controlando a densidade. Essa característica aprimora a utilização desses elementos na desoxidação e liga do aço e ligas metálicas. Assim, compreender e controlar as propriedades físicas e químicas dos elementos predominantes é essencial para assegurar a eficiência e o desempenho adequado das ferroligas na indústria metalúrgica.

A maior parte das ferroligas é empregada na fabricação de aço, seja para fins de desoxidação ou como elemento de liga. Além disso, elas são utilizadas na modificação de ferro fundido, na produção de eletrodos de soldagem e como matéria-prima para revestimentos protetores utilizados no processamento mineral. As propriedades das ferroligas dependem em grande parte das propriedades físicas e químicas dos seus elementos predominantes.

A presença de quantidades consideráveis de ferro na maioria das ferroligas possibilita a dissolução dos elementos predominantes, reduzindo sua atividade. Isso resulta na diminuição do ponto de fusão, controle da densidade e melhora na utilização desses elementos na desoxidação e liga do aço e ligas metálicas. Portanto, é fundamental compreender e gerenciar as propriedades dos elementos predominantes para garantir a eficácia e a viabilidade técnica e econômica das ferroligas.

4 DESCARBONIZAÇÃO E INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO NAS INDÚSTRIAS SIDERÚRGICAS: DESENVOLVIMENTO RECENTE, DESAFIOS E ANÁLISE TECNOLÓGICA ECONÔMICA

Segundo a World Steel Association, 1,88 bilhão de toneladas (Bt) de aço bruto foram produzidos em todo o mundo em 2020 (BASSON, 2022) e 2,21 Bt de CO₂ foram liberados. A produção de ferro e aço é um dos processos mais intensivos em energia, respondendo por 8,0% da demanda global de energia. Algumas grandes empresas usam gás de coqueria rico em hidrogênio (COG) para a BF. À medida que a metalurgia do hidrogênio evolui, espera-se que a proporção de hidrogênio para carbono aumente em breve. A tecnologia de redução de fundição produz ferro diretamente do carvão e do minério de ferro fino. No entanto, essas tecnologias para reduzir significativamente as emissões de CO₂ dependem da integração de tecnologias CCS (SHAHABUDDIN et al., 2023).

Outra forma de reduzir as emissões de CO₂ do processo BF-BOF tradicional é injetar parcialmente hidrogênio no processo. A participação geral do uso de DRI em EAF é de cerca de 5% (BASSON, 2022; MIDREX, 2020). Dependendo da fonte de eletricidade, a rota EAF usa 100% de sucata e produz CO₂ comparativamente baixo, até 680 kg CO₂ por tonelada de aço. Existem projetos em todo o mundo para extrair carbono da indústria siderúrgica usando hidrogênio. Uma mistura de 80% DRI com 20% de sucata resulta em emissões de CO₂ de 885 a 1125 kg CO₂ de aço. A tecnologia H2DRI-EAF está atualmente bem estabelecida com um nível de prontidão tecnológica (SHAHABUDDIN et al., 2023).

Os principais desafios na integração do hidrogênio na produção de aço são identificados e possíveis estratégias de solução são propostas. Os níveis de prontidão técnico-econômica e tecnológica são analisados e comparados com trilhos de aço convencionais. Existem revisões limitadas sobre esses tópicos na literatura aberta (SHAHABUDDIN et al., 2023)

4.1 PRINCIPAIS OPÇÕES DE TECNOLOGIA À BASE DE CARVÃO / COQUE

- **DESCARBONIZAÇÃO DA ROTA BF-BOF DE TECNOLOGIA CONVENCIONAL**

O BF-BOF é um dos processos com maior consumo de energia e com as maiores emissões de CO₂. BF-BOF normalmente precisa de 20 a 30 GJ de energia para produzir uma tonelada de aço. Existem vários ensaios em todo o mundo para substituir fornos de carvão e coque processado por coque de biomassa. A principal preocupação com a produção de redutores à base de biomassa é sua viabilidade econômica em comparação com produtos de origem fóssil. Na Austrália, por exemplo, o preço da biomassa (US\$ 260 a tonelada) é cerca de três vezes maior que o do carvão (Feliciano-Bruzual, 2014). Também há desafios técnicos na incorporação do carbono derivado da biomassa no processo de fabricação do ferro (SHAHABUDDIN et al., 2023).

O gás de coqueria (COG), composto principalmente de H₂ e CO, é injetado para substituir parcialmente o coque de fornalha para reduzir as emissões de CO₂. Vários testes usando COG e gás natural estão sendo conduzidos comercialmente em todo o mundo. Também foi enfatizado que o benefício do uso dessa tecnologia é mais amplo, incluindo a aplicação do CO₂ armazenado para a produção de biocombustíveis.

O objetivo final do projeto COURSE50 é reduzir as emissões de CO₂ em 30% até 2050. Problemas com o consumo de COG incluem a formação de película de gás nas paredes do forno que danifica o material refratário e o revestimento. Outra técnica para reduzir o consumo de coque no processo BF é o uso de resíduos plásticos. Substituir o coque pelo mesmo peso de resíduos plásticos pode reduzir as emissões de CO₂ no processo BF em mais de 30% (LONG et al., 2005). Existem desafios no uso de resíduos plásticos, incluindo fornecer plástico de boa qualidade por meio da reciclagem, descarte de plástico PVC ou dicloração e processos complexos (SHAHABUDDIN et al., 2023).

O objetivo final do projeto COURSE50 é reduzir as emissões de CO₂ em 30% até 2050. Problemas com o consumo de COG incluem a formação de película de gás nas paredes do forno que danifica o material refratário e o revestimento. O acúmulo de água é um subproduto da redução do hidrogênio. A possibilidade de recompensar mais emissões de CO₂ da rota BF-BOF pode não ser substancialmente possível devido à maturidade e desenvolvimento tecnológico.

No entanto, é interessante substituir todo ou parte do coque de carvão por hidrogênio renovável produzido por energia eólica e solar. De acordo com o IEA Iron and Steel Technology Roadmap, espera-se que 14% do aço mundial seja produzido a partir de tecnologias baseadas em hidrogênio (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **TECNORED**

Tecnored é uma tecnologia de aço de baixo carbono (ferro-gusa) auto reparável que consome cerca de 20-25% menos energia do que calhas de alto-forno com emissões de CO₂ de 1388-1480 kg mil toneladas. A tecnologia Tecnored de uma subsidiária no vale usa biomassa, gás de síntese e hidrogênio como combustível.

O processo Tecnored tem custos operacionais e de capital mais baixos do que a rota BF tradicional. Pode ser possível testar a injeção de hidrogênio no poço inferior do forno para substituir parcialmente o carvão. Atualmente, a tecnologia de fundição em escala reduzida permite a produção anual de 7,5 a 7,8 milhões de toneladas de aço (0,4% globalmente) (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **MÉTODO HISARNA**

Hisarna é uma tecnologia de produção de aço a carvão desenvolvida pela Progress Steel. Ele combina as tecnologias Cyclone Converter Furnace (CCF) e Reduction Vessel (SRV). Hisarna não requer incineradores e fornos de coque. Reduz o consumo inicial de energia em 20% e as emissões de CO₂ em 20%.

A planta piloto da Hisarna está atualmente localizada em Ijmuiden, Holanda, com capacidade de produção de 60.000 toneladas de ferro-gusa por ano. A Progress Steel está construindo atualmente a segunda maior fábrica da Índia em Hisarna, que deverá estar operacional em 2030. Atualmente não há informações sobre a integração de hidrogênio no processo (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **COREX**

COREX é o processo de redução de fundição proprietário da Primetals que produz ferro diretamente do minério de ferro e carvão não coqueificável. Este processo combina redução de eixo e gaseificação de fusão. Comparado ao BF, as principais vantagens desse processo são 18% menos consumo de combustível, 13% menos O₂, ~20% menos emissões de CO₂ e 30% menos emissões de NO_x.

O processo COREX emite pelo menos 45% menos poeira, 17% menos SO₂ e 97% menos NO_x. O gás de síntese ($H_2CO = 0,3-0,6$) do gás residual do processo COREX é usado atualmente na Índia e na África do Sul (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **PROCESSO FINEX**

O processo FINEX é uma tecnologia já testada, com a primeira produção industrial em 2007 e com capacidade de 1,5 Mta. Em 2014, a instalação de Pohang da POSCO construiu uma capacidade de produção de aço de 2,0 Mthane com base no processo FINEX (FINEX 2, 2020). O processo FINEX foi desenvolvido em conjunto pela austríaca PRIMETALS Technologies e pela siderúrgica coreana POSCO. Neste processo, o minério fino e os materiais de enchimento fluem para baixo, enquanto o gás redutor quente da gaseificação do carvão flui para cima. As partículas de ferro reduzidas são compactadas a quente antes de serem alimentadas no gaseificador fundido para produzir ferro-gusa, como o alto-forno (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **CIRCOFER E MXCOL**

Circofer e MXCOL são duas tecnologias de produção DRI baseadas na gaseificação de carvão. A tecnologia Circofer foi desenvolvida pela Lurgi Metallurgie na Alemanha. O MXCOL foi desenvolvido em conjunto pela Synthesis Energy Systems (SES) e pela MIDREX Technologies (SHAHABUDDIN et al., 2023).

A tecnologia MXCOL combina uma planta de gaseificação e uma planta DRI baseada em um alto-forno MIDREX que pode produzir aço a um custo de capital menor do que a siderurgia integrada. SES-MXCOL produz 1,92 toneladas de CO₂ por tonelada de aço bruto usado em EAF, em comparação com 1,56 e 1,87 toneladas usando tecnologias MXCOL e BFBOF baseadas em COG.

4.2 OPÇÕES BASEADAS EM GÁS PARA INTEGRAÇÃO COM HIDROGÊNIO: REDUÇÃO DIRETA DE FERRO E FORNO A ARCO ELÉTRICO

A redução direta de ferro (DRI) é uma técnica usada para reduzir diretamente o ferro usando coque de carvão ou combustíveis líquidos e gasosos sem converter materiais ferrosos em uma etapa de fundição. BF-BOF foi a tecnologia dominante na produção de aço até o desenvolvimento do processo DRI com HYL na década de 1950 e o processo MIDREX na década de 70. O acesso ao hidrogênio renovável barato permitirá que muitos países usem o DRI baseado em hidrogênio. A redução à base de hidrogênio é um processo endotérmico, o que significa que o calor deve ser fornecido para realizar a reação. Os principais desafios no processo H₂DRI incluem o fornecimento sustentável de hidrogênio renovável, o equilíbrio do teor de carbono necessário no aço e a remoção de impurezas do material que passa. Também existe a preocupação de que, após o tratamento DRI, o carbono hidrogênio seja zero (SHAHABUDDIN et al., 2023).

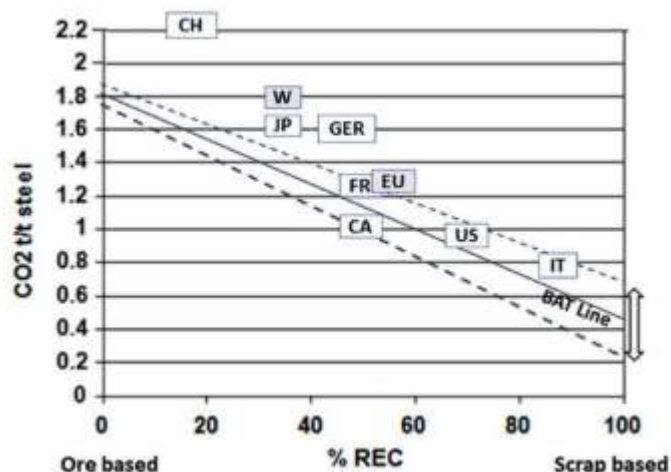
A redução da hematita (Fe₂O₃) é instável abaixo de 570°C. A temperatura é um parâmetro crítico que afeta a eficiência da redução de ferro usando hidrogênio. Um aumento na temperatura acima de 800 °C leva à formação de ferro denso. Essa camada densa reduz a cinética geral de difusão no sólido. Os diferentes estágios de redução da hematita dependem da extensão da oxidação do gás. Como pode ser ajustado, o hidrogênio como redutor ajuda a aumentar a zona estável da fase de ferro com o aumento da temperatura e pelo contrário, a eficiência de redução mostra uma tendência oposta usando CO (SHAHABUDDIN et al., 2023).

Oh e Noh (2017) estudaram a cinética de redução do óxido de ferro sob atmosfera de H₂ e CO usando análise termogravimétrica (TGA) sob condições isotérmicas de 550 a 1300 °C. A eficiência de redução de Fe₂O₃ a Fe foi de 99,9% a 800 °C. Eles observaram maiores encolhimentos de partículas subatômicas de partículas de ferro usando ferro do que CO. Não houve emissão de CO₂ no processo H₂DRI, mas o CO₂ emitido pelo EAF foi de 300 kg CO₂ t

de aço, 84% a menos que a rota convencional BF-BOF. Mais pesquisas são necessárias para obter parâmetros cinéticos mais precisos sob condições operacionais industriais otimizadas, especialmente com hidrogênio (SHAHABUDDIN et al., 2023).

Fornos de arco elétrico (EAF) são usados para derreter redução direta e sucata para produzir aço usando eletricidade. Patisson e Mirgaux relatam emissões de CO₂ 47% menores para a rota EAF com DRI do que a rota BF-BOF convencional com base no ciclo de vida. A figura 1 abaixo mostra as reduções de CO₂ por taxas DRI para diferentes países (SHAHABUDDIN et al., 2023).

Figura 3: Emissão específica de CO₂ referente à parcela de DRI e sucata



Fonte: Holappa, 2020

A emissão usando 35% REC e 65% DRI reduz o CO₂ em 17–35%. As linhas pontilhadas superior e inferior mostram os combustíveis fósseis dominantes e a eletricidade renovável de baixa emissão (SHAHABUDDIN et al., 2023).

• PROCESSO DE FORNO DE EIXO MIDREX

A tecnologia de alto-forno MIDREX produz aproximadamente 80% do DRI global, totalizando 78,67 toneladas em 2020. O processo DRI no MIDREX está sendo realizado usando gás natural e hidrogênio (MILLNER et al., 2017). No processo de hidrogênio híbrido, o gás hidrogênio é parcialmente alimentado com gás natural.

Desde 1969, o MIDREX testou e testou o efeito de aumentar a proporção entre hidrogênio e CO em várias plantas. Em uma usina de gás natural padrão, o suprimento de hidrogênio pode chegar a 30% sem modificar a usina. No processo integrado de hidrogênio puro, não há necessidade de reformador, mas sim de aquecedor a gás. Um processo integrado de hidrogênio puro consome 550 Nm³ tDRI como agente redutor.

A ArcelorMittal está desenvolvendo uma planta comercial de hidrogênio em Hamburgo, Alemanha. Esse processo tem potencial para reduzir as emissões de CO₂ em até 80% em relação à rota do alto-forno (SHAHABUDDIN et al., 2023).

A tecnologia dos fornos MIDREX depende da substituição do gás natural pelo hidrogênio. Dependendo da porcentagem de hidrogênio, a emissão de CO₂ pode ser 30-80% menor que o BF-BOF. As emissões de GEE da produção total de aço usando o forno de cuba integrado MIDREX EAF são estimadas em 1,1 t CO₂ t_{ls} (SHAHABUDDIN et al., 2023).

• PROCESSO DE REDUÇÃO DIRETA HYL / ENERGIRON

O processo HYL Energiron usa um forno de cuba de gás natural para produzir cerca de 12% do DRI global. A planta piloto da Hylsa em Monterrey tem uma capacidade de 36 t/d (DUARTE, 2015), produção de aço à base de hidrogênio aumentará em fevereiro de 2021. Eles afirmam que seus tanques são 100% compatíveis com hidrogênio. Já o processo de redução direta HYL Energiron será comissionado em fevereiro de 2021. Ao contrário do processo MIDREX, este processo não requer equipamento externo de conversão de gás. A pressão escalante e a baixa velocidade do redutor de 2,0 m/s fornecem alta eficiência.

O processo ENERGIRON-ZR tem uma alta taxa de metalização de 94%, baixo consumo de energia, menores emissões de CO₂ e 83-87% maior eficiência geral do que outros processos convencionais. O nível de prontidão tecnológica do processo ENERGIRON-ZR é > 7, o que o torna uma das opções mais promissoras para o uso de 100% de hidrogênio (SHAHABUDDIN et al., 2023).

O H₂-DRI fabricado a partir do processo ENERGIRON-ZR mantém o teor de carbono necessário injetando uma certa porcentagem de gás natural ou carbono puro no FAE. O processo de injeção de gás natural emite 150 kg CO₂ de aço líquido, enquanto o processo de injeção de carvão puro cita o impacto ambiental favorável do uso de carvão puro (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **HÍBRIDO**

Uma joint venture entre SSAB, LKAB e Vattenfall está construindo uma usina siderúrgica sem combustível fóssil conhecida como Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology (HYBRIT) na Suécia. O projeto iniciou recentemente a fase de produção piloto que deve iniciar a produção comercial até 2025 (esperado para HYBRIT e Fossil). O processo HYBRIT requer 1,5 tonelada de minério de ferro para produzir 1 tonelada de aço fundido. Com base nos preços atuais, o custo de produção do aço com essa tecnologia será 20-30% maior do que na rota convencional do alto-forno. A biomassa será utilizada como fonte de carbono no processo de moagem subsequente (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **CIRCUNDADO**

No processo Circored, o minério de ferro é pré-reduzido no sistema de leito fluidizado circulante (CFB) (primeira etapa) com hidrogênio puro proveniente da reforma do metano. O DRI secundário é descarregado em um aquecedor de flash a 630–650 °C, que é então usado para fazer HBI ou aço usando EAF. O consumo total de energia do processo integrado Circored EAF é de 18,3 GJ tl, com uma emissão de CO₂ correspondente de 1206 kg tl. O processo Circored produz carbono zero DRI HBI reduzindo o hidrogênio puro. Os desafios do EAF são a produção de escória espumosa, menor temperatura de reação, formação de iceberg e manutenção do teor de carbono na siderurgia. É necessária uma grande injeção de carbono e O₂, que é controlada pela remoção do metal (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **PROCESSO FINMET**

VAL e FIOR desenvolvem um processo FINMET na Venezuela usando gás de síntese como redução de vapor de metano (SMR). Este processo contém uma série de reatores de leito

fluidizado interconectados. A partícula fina de minério de ferro flui do topo para o fundo do reator por gravidade, enquanto o gás de síntese rico em hidrogênio pré-aquecido flui para cima. Nenhuma tentativa foi feita para usar hidrogênio puro neste processo.

Ao contrário das tecnologias MIDREX e HYL, o processo FINMET pode processar pós finos de minério. Essa tecnologia de leito fluidizado pode processar minério de ferro diretamente a baixo custo com alta flexibilidade de processo. Os desafios do processo incluem requisitos de alta pressão, maior consumo de gás natural, menor eficiência de produção e aglomeração de partículas de minério (SHAHABUDDIN et al., 2023).

4.3 FABRICAÇÃO DE FERRO E AÇO À BASE DE PLASMA E ELETRÓLISE: REDUÇÃO DE FUSÃO DE PLASMA DE HIDROGÊNIO

A fundição de plasma de hidrogênio (HPSR) reduz diretamente o minério de ferro em aço fundido usando plasma de hidrogênio ionizado. Esse processo cria um arco de plasma ao passar eletricidade pelo gás hidrogênio redutor, que produz o calor necessário para derreter o ferro. A siderúrgica austríaca Voestalpine Stahl está construindo a HPSR como parte do projeto SuSteel.

Naseri Seftajani e Schenk (2018) estudam o efeito da temperatura do plasma na redução do óxido de ferro. Os resultados demonstram que o aumento da temperatura aumenta o grau de redução. No processo HPSR, a escória pode absorver hidrogênio e água no fluido fundido e então transformado em metal fundido.

A tecnologia HPSR está nos estágios iniciais de desenvolvimento e foi testada com sucesso em escala de laboratório. O TRL atual do processo HPSR está em torno de 4,0 a 5,0 (DRAXLER et al., 2021, IEA, 2020), que deverá ser 6,0 em 2030 e 9 em 2050 (SHAHABUDDIN et al., 2023).

- **ELETRÓLISE ALCALINA DE FERRO**

A eletrólise de ferro alcalino (AIE) ou eletrólise é um processo de redução direta do minério de ferro a baixas temperaturas. Dependendo da fonte de energia, este processo tem um potencial de redução de CO₂ de 87-95% (DRAXLER et al., 2021; LAVELAINE, 2020;

HAMMERSCHMID et al., 2021). Este processo pode usar 31% menos energia do que os métodos convencionais. De acordo com o processo ULCOWIN AIE, normalmente são necessárias 1,5 toneladas de ferro para produzir 1 tonelada de aço líquido.

O processo envolve a redução do ferro da hematita natural à temperatura ambiente (25 °C) e pressão (1 atm). Termodinamicamente, a energia necessária para realizar a reação é de 6,85 GJ t Fe (LAVELAINE, 2020). Há potencial para usar o hidrogênio emergente produzir eletricidade a partir de fontes renováveis de baixo custo.

Em 2050, prevê-se que o custo unitário do capital se situe entre 755 e 970 USD lt (JOAS et al., 2019). O requisito total de energia para o processo de EIA é calculado em 12,96 GJ tl. Os desafios desse sistema incluem purificação, refinamento e processamento hidro metalúrgico da solução.

• ELETRÓLISE DE ÓXIDO FUNDIDO

A eletrólise de óxido fundido (MOE) é um método metalúrgico para a produção direta de ferro fundido a partir do minério de ferro. Este processo de uma etapa não requer uma operação de lixiviação e pode produzir ferro líquido quase puro a partir de minérios virgens e aditivos de escória. MOE tem um potencial de redução de CO₂ de 96% (DRAXLER et al., 2021).

Atualmente, a produção de aço com processo integrado de hidrogênio é limitada. O consumo de energia do processo é de aproximadamente 14,75 GJ t. A eficiência do MOE de Faraday está entre 70 e 90%. A viabilidade comercial de ânodos inertes para MES não é clara e depende de pesquisa e desenvolvimento. MIDREX e HYL são atualmente as tecnologias DRI baseadas em hidrogênio. Estão ocorrendo testes em todo o mundo para integrar o hidrogênio em processos estabelecidos usando carvão e gás natural. O custo de capital do processo é de aproximadamente 265 USD t de aço bruto, e os custos operacionais projetados estão entre 620 e 740 USD (SHAHABUDDIN et al., 2023).

4.4 DESAFIOS DA INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO NAS INDÚSTRIAS SIDERÚRGICAS

Uma usina com capacidade de 1,0 Mt ano de aço exigirá 104,0 kt ano de hidrogênio, ou 11,87 toneladas de H₂ h ou 141,757 Nm³H₂ h. Muitos desafios técnicos e econômicos devem ser superados antes que a tecnologia baseada em hidrogênio possa ser aceita na indústria

siderúrgica. Entre 2000 e 2009, o teor total de Fe do minério de ferro global diminuiu aproximadamente 4,0% (YELLISHETTY et al., 2022). Na Austrália, que possui as maiores reservas (28%) e exportações (39%), a qualidade do minério de ferro mostra uma tendência semelhante (US GEOLOGICAL SURVEY, 2021) termodinamicamente, a eficiência de redução usando hidrogênio é maior que a de CO.

No entanto, devido à natureza endotérmica da redução de hidrogênio, é difícil manter a temperatura no forno. A remoção e controle de impurezas incluindo N, H, S e P no forno elétrico a arco é difícil com o uso de DRI de baixo teor de carbono zero. O DRI de hidrogênio com zero carbono feito de minério de baixo teor pode anular o benefício de usar hidrogênio para fabricar aço. O carbono é frequentemente fornecido na forma de ferro briquetado a quente (HBI) ou mesmo carbono puro a granel.

À medida que o teor de carbono diminui no processo, o ponto de fusão do ferro aumenta e requer mais consumo de eletricidade. A transição para uma economia de hidrogênio na indústria siderúrgica dependerá em grande parte da disponibilidade de hidrogênio verde acessível. Atualmente, o preço do hidrogênio não é competitivo, principalmente quando comparado à produção de aço de baixo carbono. Vários estudos foram realizados para resolver os problemas como no processo MIDREX, introduzindo biochar, tornando o processo neutro em carbono (SHAHABUDDIN et al., 2023).

4.5 COMPARAÇÃO TECNO ECONÔMICA E NÍVEL DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA

Uma rota potencial para mitigar o CO₂ é a injeção de H₂ e BF, incluindo a reciclagem de gás de topo (TGR). De acordo com o roteiro de tecnologia de ferro e aço da IEA (IEA, 2020), o TRL atual dessa tecnologia é 7, o que é esperado para o desenvolvimento industrial até 2025. O papel dessa rota na meta NZE é considerado médio porque uma substancial quantidade de carvão coque ainda será necessária para o processo. A necessidade de pesquisa inclui a investigação de controle de plasma, controle de processo, injeção de gás e processamento de gás. Espera-se também que a substituição do carbono fóssil por tecnologia de biomassa na rota BF desempenhe um papel médio na NZE devido à sua baixa capacidade de reduzir as emissões de CO₂ sem CCS (20 e 30%) (SHAHABUDDIN et al., 2023).

Em média, o consumo de energia ao longo da rota BF-KP é tipicamente 25,0 GJ tf. O consumo de energia para o processo de redução de fundição foi maior do que o do processo BF.

Comparando os processos de plasma e eletrólise, o AES usa aproximadamente metade do ferro das tecnologias HPSR e MOE. Os custos operacionais e de capital dessas tecnologias são altamente voláteis e dependem de muitos fatores, incluindo localização da fábrica, políticas e legislação locais. Testes em larga escala desses processos são necessários para confirmar essas previsões. O custo operacional indicativo da rota BF-BOF é de aproximadamente US\$ 150 t de aço. Já a OPEX atual para eletrólise de cuba, plasma e forno e tecnologias DRI-EAF sinalizam custos 3 a 5 vezes mais altos em comparação com a rota BF BF-BOF. Os custos operacionais das tecnologias baseadas em plasma de hidrogênio e eletrólise (EIA, MOE, HPSR) dependem essencialmente do custo do hidrogênio e da eletricidade (SHAHABUDDIN et al., 2023).

5 FERROLIGAS E NÍQUEL ELETROLÍTICO

5.1 FeMnBC – FERRO MANGANÊS BAIXO CARBONO

A ferroliga FeMnBC é uma liga composta por ferro, manganês, carbono, sendo utilizada na fabricação de aço para conferir propriedades específicas ao material. Essa ferroliga é reconhecida por proporcionar melhorias nas características do aço, como aumento da resistência, dureza e temperabilidade (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

A produção da ferroliga FeMnBC envolve a utilização de dois métodos principais. O primeiro método consiste na redução silicotérmica do minério de manganês e da escória rica em MnO, enquanto o segundo método envolve a oxidação controlada da liga de ferromanganês de alto teor de carbono. Além disso, a adição de cal durante o processo contribui para aumentar a basicidade e reduzir a atividade do dióxido de silício (SiO₂) presente na escória. Ao reduzir o teor de carbono na liga, o resultado é um material com menor resistência e dureza, porém com maior tenacidade e ductilidade. A ferroliga de ferro-manganês baixo carbono é frequentemente utilizada em aplicações que exigem boas propriedades de conformação, soldabilidade e resistência à corrosão. (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Durante a produção, são empregados dois tipos de fornos. Um deles é um forno de escória, utilizado para preparar um óxido fundido contendo aproximadamente 55% de MnO. O outro é um forno de arco submerso, usado para produzir ligas de silício-manganês. A composição da escória desempenha um papel importante na qualidade final da ferroliga FeMnBC, sendo necessário um teor de MnO entre 25% e 30% para obter um metal final com baixos teores de carbono e silício (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Figura 4: Amostra FeMnBC



Fonte: Minha Autoria, 2023

5. 2 FeMnAC – FERRO MANGANÊS ALTO CARBONO

A ferroliga Ferro-Manganês Alto Carbono é uma liga metálica composta predominantemente por ferro (Fe), manganês (Mn) e carbono (C). Nessa liga, o teor de carbono é mais elevado em comparação com outras variações de ferro-manganês. (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

O manganês desempenha um papel importante na ferroliga, pois atua na desoxidação do ferro, removendo impurezas, como o oxigênio. Além disso, o manganês contribui para aumentar a resistência mecânica e a dureza do material, além de aprimorar a capacidade de endurecimento. Portanto, a ferroliga de ferro-manganês alto carbono é comumente utilizada como agente de liga em aços. (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

A ferroliga FeMnAC é adicionada ao aço durante o processo de produção, normalmente na etapa de refino do aço líquido. A quantidade de ferroliga adicionada varia de acordo com as especificações do aço desejado. A adição da ferroliga FeMnAC resulta em diversas propriedades benéficas ao aço, tais como aumento da resistência mecânica, melhoria da resistência à corrosão e refinamento da microestrutura. Além disso, a adição de carbono permite ajustar a dureza e a temperabilidade do aço, tornando-o mais adequado para diferentes aplicações. Devido ao teor mais elevado de carbono, essa liga apresenta maior resistência e dureza. A presença do carbono, juntamente com o manganês, forma carbonetos, que contribuem para melhorar as

propriedades mecânicas do material. (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Figura 5: Amostra FeMnAC



Fonte: Minha Autoria, 2023

5. 3 FeV – FERRO VANÁDIO

O ferrovanádio (FeV) é uma liga metálica composta principalmente por ferro e vanádio, sendo amplamente utilizado na indústria siderúrgica para melhorar as propriedades do aço. A produção do FeV envolve um processo de redução do óxido de vanádio (V_2O_5) por meio da reação com ferrosilício e silício, em um forno elétrico a arco. Durante a redução, também é adicionado alumínio para acelerar a extração do vanádio. A mistura é agitada para promover a homogeneização e obter um teor de silício adequado no metal. O ferrovanádio é então vazado em um molde de ferro fundido (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Uma curiosidade sobre o processo de produção do FeV é que a reação de redução é altamente exotérmica, o que significa que libera grande quantidade de calor. Além disso, a produção do ferrovanádio também pode ser realizada através de uma reação termita, na qual o vanádio e os óxidos de ferro são co-reduzidos (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

O FeV é adicionado ao aço durante o processo de produção, normalmente na etapa de refino do aço líquido. A quantidade de ferrovanádio adicionada varia de acordo com as especificações do aço desejado. A adição do FeV confere ao aço propriedades como aumento da resistência mecânica, melhoria da resistência à corrosão, aumento da dureza e melhoria da temperabilidade. Além disso, o FeV pode auxiliar na redução da fragilidade causada pelo enxofre e na melhoria da estabilidade dimensional do aço (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Figura 6: Amostra FeV



Fonte: Minha Autoria, 2023

5.4 FeSiMn – FERRO SILÍCIO MANGANÊS

O silício-manganês (SiMn) também é produzido por redução carbotérmica de matérias-primas em forno elétrico de arco submerso do mesmo tipo utilizado para a produção de HC FeMn. Os fornos SiMn normalmente variam em tamanho de 15 a 63 MVA (saída real de 13 a 57 MW) e produzem entre 80 e 340 toneladas de liga por dia. Ligas saturadas de carbono estão em equilíbrio com grafite ou SiC (em concentrações mais altas de silício). Quanto maior o teor de silício, menor o teor de carbono. Para ligas de SiMn>30% Si, está sendo praticada a adição de resíduo de silício da indústria de ferrosilício (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

O consumo de energia para produzir SiMn típico a partir de uma mistura de minério de Mn, HC FeMn, escória e metal rico em Si é tipicamente de 3.500 a 4.500 kWh de tonelada de metal. O consumo de energia aumentará com o teor de Si do metal produzido e com a quantidade de escória produzida por tonelada. O excesso de oferta da escória não é viável, pois tem uma temperatura de fusão relativamente baixa em comparação com os minérios com alto teor de MnO.

Sucatas e refugos do processo de fabricação geralmente são devolvidos ao forno. experimentos industriais mostraram que um aumento razoável de MgO na escória melhorará significativamente a recuperação do manganês. Mas não esse nível não deve cair abaixo de 11-14% MnO (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Tabela 2 - Exemplo de Parâmetros de Fusão de SiMn

TABELA 7.9 Exemplo de Parâmetros de Fusão de SiMn (base 17% Si na liga)*				
Parâmetros	Teor de Fósforo em SiMn, %			
	<0,20	0,25e0,35	0,40e0,55	>0,60
Consumo Específico, kg/ton				
Minério de manganês (base de 48% Mn)	900e1200	1250e1400	1350e1400	1650e1670
Escória de manganês (base de 48% Mn)	650e850	300e360	150e180	d
Coca	310e415	320e425	320e410	320e395
Quartzito	250e285	260e330	260e305	260e300
Fluxo (dolomita, calcário)	100	<50	d	d
Materiais reciclados e escórias de Mn	180e200	200e235	190e250	150e220
Pasta de eletrodo	27e30	24e26	24e26	23e25
Energia elétrica, kWh/ton	3600e4300	3800e4100	3800e4000	3600e3900
Teor máximo de Mn na escória, %	10e12	11e12	11e13	12e13
Relação escória/metal	1,6	1,5	1,4	1,3
Rendimento de manganês, %	75e77	79e81	80e82	82e85

*O teor de fósforo indica aproximadamente a parcela de escória de baixo P e alto MnO usada na carga, o que afeta outros parâmetros.

Fonte: GASIK, 2013: Livro Handbook Ferroalloys

A utilização da ferroliga FeSiMn na produção do aço traz diversos benefícios significativos. Essa ferroliga, composta principalmente por ferro, silício e manganês, é adicionada ao aço devido às suas propriedades de ligação e desoxidantes. O silício presente na ferroliga atua como um agente desoxidante, removendo impurezas como oxigênio e enxofre do aço líquido, o que resulta em uma melhoria na qualidade do aço (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Além disso, a adição de manganês promove a formação de carbonetos, que aumentam a resistência e a dureza do aço. O FeSiMn também contribui para o refinamento dos grãos do aço, resultando em uma microestrutura mais homogênea e melhorando suas propriedades mecânicas. A ferroliga FeSiMn é adicionada ao aço durante a etapa de refino do aço líquido, geralmente por meio de injeção direta na panela de vazamento. Essa adição controlada permite ajustar as proporções adequadas de silício e manganês no aço, garantindo as características desejadas para o produto (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Fig. 7. Amostra FeSiMn



Fonte: Minha Aatoria, 2023

5.5 FeNb – FERRO NIÓBIO

O nióbio, junto com o tântalo, aparece em um grande grupo de minerais (tantaloniobatos) seis dos mais de 130 minerais conhecidos contendo nióbio são de importância industrial direta (GASIK et al., 2009) columbita $(\text{Fe,Mn})(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$ (~50% a 67% Nb_2O_5) e pirocloro $(\text{Ca,Na})_2\text{O}_6(\text{OH,F})$. Uma reação de redução de Nb_2O_5 por carbono é possível, mas eventualmente levará à formação de carboneto de nióbio (NbC). O teor de nióbio no ferro Nióbio padrão é geralmente entre 55% e 65% em peso. A melhor extração de nióbio é obtida pela redução do alumínio. A temperatura do processo de tribunal aluminothermal eficaz é 1.800-2.000°C (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

O FeSiNb é mais difícil de dissolver em aço do que o FeNb com baixo teor de silício e, portanto, a liga é primeiro retificada em tamanhos abaixo de 20 mm. Para melhorar a dopagem de nióbio em ligas de aço de baixo Nb, diferentes ligas principais foram projetadas e construídas, incluindo Fe-25Nb, Fe-30Ti-16Nb-10Al, métodos para processamento de ferro Nióbio por redução de alumínio incluem (1) fundição a granel fora do forno (lingote), (2) fundição em panela com descarga de lingote e escória e (3) fundição em forno de arco elétrico. O primeiro método não é mais amplamente utilizado porque apresenta algumas desvantagens, incluindo a combinação não ideal de fusão e cristalização. O segundo método envolve a liberação de escória de ferroligas (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

O Nb₂O₅, metal e escória são despejados em moldes de ferro fundido inclinando o forno. A taxa de fusão após o início da reação é de 160-180 kg (m²min). Já a fundição em forno a arco é ideal para o processamento de concentrados de nióbio magros. Pode ter várias versões, nomeadamente: Adição de minério, alumínio e misturas de fundentes, fusão de minério e fundentes seguida de adição de pó de alumínio. Derretimento de íons fundidos em uma etapa em um forno elétrico para recompensar a falta de calor. (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

No segundo smelter, a escória rica em nióbio é misturada com cal e fundida em um forno elétrico a arco que também contém sucata fundida. Esta opção aproveita ao máximo a redução de calor, utiliza eletricidade para o processo e potencializa a fusão da mistura com a quantidade necessária de fundente (cal). O molde de fundição revestido de MgO destinado a receber o metal e a escória é preparado durante a pré-moldagem. A primeira fusão ocorre a 140 V, leva 50 minutos para derreter o concentrado de 1200 kg. Depois que o metal foi vazado, o molde foi mantido por 2,5 h e após mais 2 h foi transferido para retificação e remoção da liga (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Fig. 8. Amostra FeNb



Fonte: Minha Autoria, 2023

5.6 FeMnMC Nit – FERROLIGA DE FERRO MANGANÊS MEDIO CARBONO

A ferroliga FeMnMC Nit é uma liga metálica composta principalmente por ferro, manganês, carbono e nitrogênio, sendo amplamente utilizada na indústria siderúrgica para aprimorar as propriedades do aço. A produção do FeMnMC Nit envolve um processo de fusão desses elementos em um forno elétrico a arco, em condições controladas de temperatura e composição química (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Cada elemento constituinte do FeMnMC Nit desempenha uma função específica. O ferro é a base da liga e contribui para as propriedades mecânicas do aço. O manganês atua como um desoxidante e auxilia na formação de carbonetos, o que melhora a resistência e a dureza do aço. O carbono aumenta a dureza e a resistência do aço, enquanto o nitrogênio auxilia na formação de nitretos, contribuindo para o aumento da resistência à tração e da resistência ao desgaste (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

A adição da ferroliga FeMnMC Nit ao aço é feita durante o processo de refino do aço líquido. A quantidade de ferroliga adicionada varia de acordo com as especificações do aço desejado. A adição controlada do FeMnMC Nit permite ajustar as proporções adequadas de cada elemento na composição do aço, garantindo as propriedades desejadas para o produto final (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

As propriedades conferidas ao aço pelo FeMnMC Nit incluem um aumento significativo da resistência mecânica, da dureza, da tenacidade e da resistência à corrosão. Além disso, essa ferroliga também melhora a resistência ao desgaste do aço, tornando-o adequado para aplicações que exigem alta durabilidade e desempenho em ambientes adversos (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Fig. 9: Amostra FeMnMC Nit



Fonte: Minha Autoria, 2023

5.7 FeCrAC – FERRO CROMO ALTO CARBONO E FeCrBC – FERRO CROMO BAIXO CARBONO

Entre os aços de alta liga, os aços inoxidáveis são um caso especial devido ao seu alto volume de produção e posição central como usuários de ferrocromo. Outras ligas de ferro também são amplamente utilizadas na produção de aço inoxidável. A redução do cromo do minério de cromita é difícil e requer altas temperaturas de $\sim 1700^{\circ}\text{C}$ (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

O teor de carbono na maioria dos aços inoxidáveis deve ser muito baixo (normalmente abaixo de 0,05%) para evitar a formação de carbonetos. O problema do carbono está relacionado ao cromo: quando o carbono oxida para ser removido, o Cr também começa a oxidar. Quantidades maiores de cromo devem ser adicionadas após a descarbonetação usando FeCr de

baixo carbono (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

O aço inoxidável pode ser dividido em vários grupos, dependendo da liga e da estrutura. Os aços inoxidáveis austeníticos (Sequência ASTM 300) constituem o maior grupo, respondendo por 55% a 60% de todos os aços inoxidáveis. Um exemplo típico é o aço 188 com 18% Cr e 8% Ni (GASIK, 2013).O aço duplex possui melhores propriedades mecânicas devido a sua estrutura. Os aços inoxidáveis martensíticos pertencem ao grupo dos aços ferríticos, mas possuem maior teor de carbono. Se for desejada uma melhor resistência à corrosão, especialmente contra pitting, o teor de níquel é aumentado de 11% para 14% (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Após o ano 2000, a produção de aços da série 200 aumentou (GASIK, 2013) principalmente na China e na Índia. A maior parte do cromo é adicionada na forma de FeCr com alto teor de carbono (50-55% Cr, 2-5% Si, 6-8% C e o restante FeCr). Diferentes ligas de Cr são construídas com maior teor de Cr e menor teor de carbono (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Ambas as ferroligas são produzidas em fornos de arco elétrico, envolvendo a fusão de minérios de ferro, cromo e elementos de liga, seguida pela solidificação da liga metálica e quebra em pequenos pedaços, chamados de ferroligas. O resultado é a obtenção das ferroligas Fe-CrAC e FeCrBC, que são utilizadas como adições de liga na fabricação de aço para conferir propriedades específicas ao material (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Fig. 10: Amostra FeCrBC



Fonte: Minha Aatoria, 2023

Fig. 11: Amostra FeCrAC



Fonte: Minha Aatoria, 2023

5. 8 FeMo – FERRO MOLIBDÊNIO

A liga de ferromolibdênio (FeMo) é obtida por meio do processo de redução do óxido de molibdênio com silício e alumínio em um forno elétrico. Esse processo aproveita a natureza exotérmica da reação para produzir uma liga contendo cerca de 60% de molibdênio, embora também seja possível obter variações com teores de 50% a 58% de Mo (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

A adição de FeMo ao aço fundido apresenta desafios devido ao alto ponto de fusão e à alta densidade da liga. A dissolução da liga ocorre em um banho de aço agitado a 1600 °C, levando aproximadamente 1,2 minutos. Durante o processo de fundição do FeMo, ocorrem duas etapas: a reação e a separação de gases e sólidos. O controle do tempo da primeira etapa é realizado com base na liberação específica de calor da carga (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

A liga de FeMo é adicionada ao aço com o propósito de melhorar suas propriedades. O molibdênio atua como um elemento de liga, conferindo resistência à corrosão, maior resistência mecânica e maior temperabilidade ao aço. O silício e o alumínio são utilizados na redução do óxido de molibdênio e facilitam o processo de fundição (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

No entanto, a produção do FeMo gera uma quantidade considerável de fumaça contendo MoO₃ e outros metais não ferrosos. Para lidar com esse problema, é realizado o processo de granulação do pó coletado, utilizando coque, cal e espato flúor. A adição de cal auxilia na ligação do molibdênio ao CaMoO₄, reduzindo a perda de vapor e aumentando a temperatura de redução (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Fig. 12: Amostra FeMo



Fonte: Minha Aatoria, 2023

5. 9 FeTi – FERRO TITÂNIO

O ferrotitânio possui diversas aplicações e curiosidades interessantes. Um dos principais elementos constituintes, o titânio, desempenha um papel fundamental na melhoria das propriedades mecânicas do aço, tais como resistência à tração, dureza e tenacidade. Além disso, o titânio contribui para a formação de carbonetos de titânio, que podem melhorar a resistência ao desgaste e à corrosão do aço (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

No processo de adição do FeTi ao aço, a liga é geralmente introduzida no aço líquido antes da solidificação, seja diretamente no cadinho do forno ou através de um alimentador automático. A quantidade de FeTi a ser adicionada depende do teor de titânio desejado no aço final, bem como das propriedades requeridas para a aplicação específica (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

As propriedades conferidas ao aço pelo ferrotitânio incluem aumento da resistência mecânica, melhoria da resistência à corrosão e à oxidação em altas temperaturas, além de maior estabilidade dimensional. O refinamento dos grãos do aço promovido pelo titânio resulta em melhor usinabilidade e resistência a trincas (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Fig. 13: Amostra FeTi



Fonte: Minha Autoria, 2023

5. 10 FeP – FERRO FÓSFORO

O ferrofósforo pode conter P variando de 24% a 28% e é usado tanto na forma granulada quanto na forma de pó. O FeP em pó destina-se principalmente ao uso em pós metalúrgicos da metalurgia ferrosa. No aço, o fósforo é geralmente uma impureza indesejável, mas em alguns casos, quantidades apropriadas de fósforo são úteis. O ferrofósforo pode ser produzido em fornos elétricos e altos-fornos. A maior parte do FeP é feita de uma liga que é um subproduto da produção de fósforo pela redução do carbono dos fosfatos de cálcio. Este processo é realizado em forno de arco submerso fechado (fechado), pois todo vapor de fósforo reduzido deve ser devidamente recolhido (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

A adição de ferro-fósforo (FeP) aos aços é realizada para conferir propriedades específicas ao material. O FeP é adicionado durante o processo de fabricação do aço, geralmente no cadinho do forno ou por meio de um alimentador automático, quando o aço se encontra em estado líquido (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

A principal função do ferro-fósforo é melhorar a usinabilidade do aço, ou seja, facilitar o processo de usinagem, como corte, perfuração e fresagem. O fósforo presente na liga promove a quebra de cavacos durante a operação de usinagem, reduzindo o desgaste das ferramentas e aumentando a vida útil delas, além de ser útil contra a corrosão (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Além disso, o ferro-fósforo também pode atuar como um agente de refino de grão, promovendo a formação de grãos mais finos no aço. Isso resulta em melhorias nas propriedades mecânicas, como resistência à tração, tenacidade e ductilidade (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

É importante ressaltar que a adição de ferro-fósforo deve ser feita em quantidades controladas, levando em consideração os requisitos específicos do aço e da aplicação final. O teor de fósforo adicionado pode variar dependendo das necessidades, mas geralmente situa-se na faixa de 0,1% a 1,0% (GASIK, 2013); (ANDRADE et al., 1999);(COLPAERT,2008);(SILVA E MEI, 2006).

Fig. 14: Amostra FeP



Fonte: Minha Aatoria, 2023

5. 11 FeB – FERRO BORO

O boro é o segundo elemento não metálico mais leve da tabela periódica, depois do hidrogênio e do hélio. O boro natural consiste nos dois isótopos estáveis ^{10}B (19,57%) e ^{11}B (80,43%). O boro é um elemento de micro liga típico porque mesmo pequenas adições ao aço têm um grande impacto nas propriedades mecânicas. O boro é adicionado ao aço por sua capacidade única de aumentar a temperabilidade quando presente em concentrações de cerca de 1%. 0,001% a 0,004% podem ser substitutos eficazes para elementos de liga mais tradicionais. Ferroboro também pode ser adicionado para evitar o efeito do nitrogênio introduzido e melhorar a conformabilidade do aço (GASIK, 2013).

Boro e silício formam os aglutinantes estáveis de silicato de boro SiB_3 , SiB_6 e SiB_{14} . O boro também forma boretos estáveis com muitos metais. Com o oxigênio, o Boro produz vários óxidos. Mais de cem tipos de minério de borosilicato são conhecidos. O boro pode ser reduzido de sua forma de óxido com carbono, silício ou alumínio. A redução de silício não é termodinamicamente favorável e não é usada na prática. o alumínio é a única opção para usinagem de ferro com liga de boro e ligas de base, onde o teor de carbono deve ser mínimo (GASIK, 2013).

Ferroboro é o aditivo mais comum na indústria siderúrgica. A maior parte das matérias-primas para o processo de redução de alumínio são minério de borato e sucata secundária de alumínio. As ligas mestras de boro são mais eficientes em termos de utilização de cátions e estabilidade dos resultados. O processo de fundição pode ser dividido em três etapas: formação do fundido, redução do óxido e processamento da escória. A mistura de ignição é pré-carregada e aquecida por um arco elétrico. Metade da carga principal é carregada e fundida, então metade do precipitante rico em ferro é adicionado e o forno é desligado até que a escória seja removida (GASIK, 2013).

O material e o equilíbrio térmico do alumínio ferroboro fundido são mostrados nas Tabelas 17.4 e 17.5. Também é possível fundir o FeB tanto com fluxo de escória quanto com fluxo de liga, o que permite um melhor aproveitamento do calor latente e acumulado. A redução de carbono pode ser usada quando não há limite alto no teor de carbono de ferro boro. Este método pode produzir 10-20% B e 4-6% C.

Fig. 15: Amostra FeB



Fonte: Minha Aatoria, 2023

5. 12 FeSi 75% - FERRO SILÍCIO 75%

Ferrosilício reduz a oxidação de elementos valiosos como o Cr na produção de aço inoxidável. Também é usado como elemento de mistura para melhorar a flexibilidade. resistência

à tração e resistência de fundição de aço. A maior parte do silício produzido é usado como elemento de liga no alumínio para melhorar as propriedades mecânicas das ligas de alumínio fundido e forjado. Os silicões podem ser óleo líquido, graxa, borracha e resina sólida. Os silicões são quimicamente inertes, resistentes à água e estáveis até 400°C. Eles são usados para fins médicos, isolantes elétricos, revestimentos protetores. A propriedade mais importante do silício é o seu conteúdo de elementos impuros (GASIK, 2013).

Desde o início do século 21, a produção de silício aumentou gradualmente de 1,1 zilhão para quase 1,8 zilhão de toneladas. O maior produtor é a China, que respondeu por quase 50% em 2010. Roskill (2011) relata que os quatro maiores produtores de silício são Ferroatlantica, Dow Corning, Elkem Bluestar e Globe Specialty Metals. A solubilidade do carbono no sistema Fe-Si-C depende da temperatura e do teor de silício, e diminui com maiores concentrações de silício. Em altas temperaturas, tanto o carbono quanto o silício se dissolvem bem no ferro, mas após o resfriamento, o excesso de fase (C ou SiC) precipita do fundido. O ferrossilício (especialmente com baixo teor de Si) pode ser granulado despejando-se um fluxo controlado de liga fundida em um tanque de água (GASIK, 2013).

O ferro-silício com alto teor de alumínio é usado na produção de ferro cinzento esférico para controlar e reduzir a formação de carbonetos. Também é conhecido por ser eficaz em minimizar a formação de carbonetos em ferro dúctil enquanto aumenta o número de nódulos. Graus de baixo teor de Si (<20% a 25% de Si) são magnéticos, o que é uma vantagem no manuseio. A poeira seca precipitada por gás geralmente contém 80% a 95% de SiO₂, 1,5% a 9% de Al₂O₃, 0,4% a 2,7% de CaO, 1% a 5% de MgO, Fe₂O₃ < 0,5% e outros < 2%. Este pó, com um tamanho médio de partícula subatômica de 5 µm, tem uma área de superfície específica muito alta (~2000 m²/g) (GASIK, 2013).

Fig. 16: Amostra FeSi 75%



Fonte: Minha Aatoria, 2023

5.13 NÍQUEL ELETROLÍTICO

O níquel eletrolítico não é uma ferroliga, mas sim uma forma pura de níquel que pode ser utilizado para conferir propriedades específicas ao aço. O níquel eletrolítico, quando adicionado ao aço, pode proporcionar diversas melhorias em suas características, tais como aumento da resistência à corrosão, melhoria na ductilidade e tenacidade, além de ajudar a reduzir o coeficiente de atrito. Essas propriedades são valiosas em diversas aplicações industriais, como na fabricação de peças para a indústria automotiva, equipamentos químicos e petroquímicos, entre outros (ANDRADE et al,2000) ;(BNDS,1999).

O processo de adição de níquel eletrolítico ao aço geralmente envolve a imersão do aço em um banho eletrolítico contendo íons de níquel, seguido pela aplicação de corrente elétrica para promover a deposição de níquel no aço. Esse processo é conhecido como eletrodeposição de níquel. A espessura e a uniformidade do revestimento de níquel podem ser controladas através da duração e intensidade do processo eletrolítico (ANDRADE et al,2000) ;(BNDS,1999).

É importante ressaltar que o uso de níquel eletrolítico para conferir propriedades ao aço depende das características específicas do aço e das necessidades da aplicação em questão. Portanto, é essencial realizar estudos e testes prévios para determinar a quantidade adequada de

níquel eletrolítico a ser adicionado e garantir que as propriedades desejadas sejam alcançadas (ANDRADE et al,2000) ;(BNDS,1999).

Fig. 17: Amostra Níquel Eletrolítico



Fonte: Minha Autoria, 2023

6.MOSTRUÁRIO: MONTAGEM E EXIBIÇÃO

6.1 MONTAGEM

Foi realizado um trabalho com o objetivo de desenvolver uma caixa de amostra para o aprendizado de novos estudantes no departamento de engenharia de materiais. O projeto consistiu na montagem de uma caixa em madeira com dimensões de 63x38x15 cm, como podemos ver na figura a seguir:

Fig. 18: Caixa de Amostra com 15 espaços para as ferroligas e níquel eletrolítico



Fonte: Minha Aatoria, 2023

A fabricação da caixa em madeira foi cuidadosamente executada, levando em consideração as especificações do desenho, com a ajuda dos funcionários da marcenaria da USP Campus São Carlos.

Para proporcionar uma visualização clara das amostras contidas na caixa, foi adquirido um acrílico transparente para servir como tampa. O acrílico foi escolhido devido à sua transparência e resistência, permitindo que as amostras fossem observadas sem a necessidade de abrir a caixa. Isso é fundamental para evitar danos às amostras e garantir a segurança dos estudantes ao manuseá-las.

A montagem final da caixa foi realizada com cuidado, garantindo que todos os componentes estivessem firmemente fixados. A tampa em acrílico foi encaixada de forma precisa,

oferecendo facilidade de acesso às amostras quando necessário. A caixa foi projetada de maneira a acomodar 15 compartimentos, onde as amostras de ferroligas seriam inseridas. Esses compartimentos foram dispostos estrategicamente para facilitar a visualização e manipulação das amostras pelos estudantes.

Fig 19: Caixa de Amostra com as ferroligas e níquel eletrolítico, já com o acrílico e identificados.



Fonte: Minha Autoria, 2023

Quanto à localização para a exibição da caixa, o ideal seria colocá-la próxima aos laboratórios de metalurgia no departamento de engenharia de materiais. Essa escolha visa oferecer uma fácil acessibilidade aos estudantes que desejam estudar e aprender mais sobre as ferroligas e suas propriedades. A proximidade com os laboratórios proporciona um ambiente propício para aprofundar o conhecimento prático sobre o tema, incentivando a interação e o aprendizado dos estudantes.

A caixa de amostra contendo as amostras de ferroligas, fornecidas pela empresa Gerdau, é uma valiosa ferramenta didática para os estudantes de engenharia de materiais. Ela permite a observação direta das amostras, facilitando o estudo das características e propriedades de diferentes ferroligas. Além disso, a exposição no departamento de engenharia de materiais proporciona uma oportunidade de aprendizado prático, aproximando os estudantes do mundo real da metalurgia e da aplicação das ferroligas na indústria.

Para facilitar o acesso dos estudantes as informações serão adicionadas a exposição da caixa duas ferramentas para ajudar na contextualização das amostras, a primeira será uma folha com as amostras e principais características e a outra será a adição de um QR Code que dará acesso a esse trabalho, para que os alunos interessados possam ter acesso facilitado a esse trabalho.

Espera-se que essa caixa de amostra seja uma fonte de inspiração para os estudantes, despertando o interesse e incentivando a exploração dos diferentes tipos de ferroligas e suas aplicações. Através dessa iniciativa, busca-se fornecer aos futuros profissionais uma base sólida de conhecimento e familiaridade com as ferroligas, preparando-os para enfrentar os desafios do campo da engenharia de materiais.

6.2 FOLHA DE CONSULTA

FERROLIGAS	QUAIS PROPRIEDADES FORNECEM AO AÇO
Ferro Manganês Baixo Carbono	Desoxidante, Refinamento de grãos, Resistência Mecânica, Tenacidade, Soldabilidade e Resistência a Corrosão.
Ferro Manganês alto Carbono	Resistência Mecânica, Temperabilidade, Aumento da Dureza, Redução da Ductilidade e Resistência a Corrosão.
Ferro Vanádio	Resistência Mecânica, Temperabilidade, Refinamento dos Grãos e Melhoria das propriedades de alta temperatura.
Ferro Silício Manganês	Maior resistência, refinamento de grãos e melhor soldabilidade ao aço.
Ferro Nióbio	Maior resistência, dureza e tenacidade ao aço
Ferro Manganês Mé- dio Carbono - Nit	Aumento da resistência, tenacidade e melhoria da resistência à corrosão ao aço.
Ferro Cromo alto carbono	Maior resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste do aço.
Ferro Cromo Baixo Carbono	Maior resistência à corrosão, dureza e melhoria das propriedades mecânicas ao aço.
Ferro Molibdênio	Maior resistência, alta temperabilidade e aumento da resistência à corrosão ao aço.
Ferro Titânio	Melhora da resistência mecânica, refino de grãos e estabilidade de carbonetos no aço.
Ferro Fósforo	Aumento da resistência e dureza, redução da fragilidade em aço.
Ferro Boro	Maior dureza, resistência ao desgaste e aumento da temperabilidade ao aço.
Ferro Silício 75%	Maior resistência, melhoria da ductilidade e aumento da temperabilidade ao aço.
Níquel Eletrolítico	Maior resistência à corrosão e aumento da tenacidade ao aço.



Agradeci-
mento a
GERDAU
pelas
amostras

7. CONCLUSÃO

As ferroligas são hoje em dia uma das principais formas de dar ao aço novas propriedades, em um mundo onde cada dia mais novas soluções são necessárias estudar e entender a atuação das ferroligas e no níquel eletrolítico na produção de ligas especiais é fundamental para criações cada vez mais específicas e otimizadas e para entender isso de forma mais completa é fundamental entender o processo com um todo.

O grande objetivo desse trabalho tirando a parte prática da construção da caixa de amostra era justamente contextualizar o leitor de todo o processo para entender a importância e as oportunidades que existem na indústria siderúrgica. Acredito que com esse trabalho é possível se ter uma contextualização direta e simplificada do processo de fabricação do aço que dá ao leitor uma base para o entendimento da importância da utilização das ferroligas no mercado de aços nacional e mundial.

Outro ponto importante discutido de forma abrangente no trabalho é a preocupação da indústria siderúrgica com a sustentabilidade, principalmente com as inovações da integração do hidrogênio, que acaba sendo talvez a solução mais atraente para descarbonizar o setor e atingir a meta de emissões líquidas zero até 2050. É provável que o caminho BF-BOF domine os fabricantes de aço por mais algum tempo por ainda ser uma rota de aço lucrativa por menor custo até o momento, porém o entendimento da necessidade e com iniciativas diferentes em diferentes partes do mundo, com certeza temos um cenário promissor para a solução desse problema nos próximos anos.

As ligas ferrosas desempenham um papel crucial na indústria metalúrgica, proporcionando características específicas aos materiais, especialmente ao aço. A análise do mercado de ligas ferrosas enfrenta desafios na obtenção de dados atualizados, devido à falta de um instituto centralizador e à demora na divulgação de informações pelos países envolvidos. No entanto, a busca por dados estatísticos é fundamental para compreender as tendências e dinâmicas desse setor, permitindo o desenvolvimento de estratégias eficazes e promovendo a inovação na indústria metalúrgica. A colaboração entre diferentes partes interessadas é essencial para superar esses desafios e melhorar a disponibilidade e a transparência das informações sobre o mercado de ligas ferrosas.

Por fim a aproximação dos alunos com a prática é um combustível para novas pesquisas e novas descobertas na área, que com certeza podem ajudar na evolução no mercado de ferroligas e conseqüentemente do aço. O fácil acesso à informação e a forma de ensino prática pode despertar no aluno maior interesse do que o aprendizado teórico. Portanto o grande objetivo desse trabalho e a forma como foi montado teve como principal objetivo uma revisão bibliográfica com a função de transformar uma caixa de amostras em muito mais que uma caixa com apenas pedras.

8. REFERÊNCIAS

D Rozhikhina, O I Nokhrina, K S Yolkin, M A Golodova. Ferroalloy production: state and development trends in the world and Russia. 2020.

Andrade, Maria Lúcia Amarante de; Cunha, Luiz Maurício da Silva; Gandra, Guilherme Tavares. Panorama da indústria mundial de ferroligas. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 10, p. [57]-113, set. 1999

Patisson, F., M'irgaux, O., 2020. Fabricação de ferro a hidrogênio: como funciona. Metais 10 (7), 922. aniem, hybrit: developmentM., Regnell, A., Wijk, O., 2020. Toward a fossil free future with Pei, M., Petaj of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland.

Sergey B., Olsen E., Loomba V., Reynolds Q., Einarsrud. A review of Ferroalloy Tapping Models. 2021.

US Geological Survey, 2021. Minério de ferro: resumos de commodities minerais, p. 2021.

NÍQUEL : novos parâmetros de desenvolvimento. [Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social], 2000. 31 p.

Oh, J., Noh, D; A cinética de redução de partículas de hematita em atmosferas de H₂ e CO. 2017. Combustível 196, 144–153.

Duarte, P., 2015. Siderurgia a Hidrogênio; Relatório técnico; TenovaHYL: SanNicolas de los Garza, México.

Gasik, MI, Lyakishev, NP, Gasik, MM, 2009. Físico-Química e Tecnologia de Ferroligas.

Hammerschmid, M., Müller, S., Fuchs, J., Hofbauer, H., 2021. Avaliação da biomassa produção baseada em gás redutor de emissões abaixo de zero para a indústria siderúrgica. Conversão de Biomassa e Biorrefinaria 11 (1), 169–187.

Gasik, Michael. Handbook Ferroalloys, 2013. University Foundation, Espoo, Finlândia

Joas, F., Witecka, W., Lenck, T., Peter, F., Seiler, F., Samadi, S., et al., Agora Energiewende e Wuppertal Institute, 2019. Indústria neutra para o clima: tecnologias-chave e opções de políticas para aço, química e cimento. Berlim.

Long, S., Meng, Q., Ma, C., Feng, X., Sun, L., 2005. Recursos ecologicamente corretos da injeção de resíduos plásticos no alto-forno. J Anhui Univ Technol (Nat Sci) 22, 488–495.

Millner, R., Ofner, H., Boehm, C., Ripke, S., Metius, M., 2017. Futuro da redução direta na Europa - Perspectiva de médio e longo prazo. Tecnologia do aço europeu e aplicação dias 26–29.

Naseri Seftejani, M., Schenk, J., 2018. Termodinâmica da redução de minério de ferro líquido por plasma térmico de hidrogênio. Metais 8 (12), 1051.

Yellishetty, M., Werner, TT, Weng, Z., 2022. Capítulo 22 - Minério de ferro na Austrália e no mundo: recursos, produção, sustentabilidade e perspectivas futuras. In: Lu, L. (Ed.), Minério de Ferro, segunda ed.

V. da Costa e Silva, A.L, Mei, P., 2006. Aços e ligas especiais 2ª edição revista ampliada.

Kumar Dutta, S., B. Chokshi, Y., 2020. Basic Concepts of Iron and Steel Making.

Colpaert, H. 2008. Metallography of steels – Interpretation of Structure and the effects of processing. Update and translated by Anré Luiz V. da Costa e Silva.

COREX®. Redução de fundição eficiente e ecológica. Disponível em: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/corex/COREX.pdf. Primetals. 2020 (Acesso em: 04/06/2023 às 9h30).

HISARNA. Construindo uma indústria siderúrgica sustentável, 2022. Ficha informativa Hisarna nr. 2/2020, disponível em: <https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/TS%20Factsheet%20Hiarna%20ENG%20jan2020%20Vfinal03%204%20pag%20digital.pdf>. (Acesso em: 02/06/2023 às 11h).

IEA. Roteiro de tecnologia de ferro e aço. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>, 2020 (Acesso em: 14/06/2023 às 15h).

LAVELAINE, H. Projeto siderwin: eletrificação da produção primária de aço para evitar emissões diretas de CO₂. Disponível em: https://www.siderwin-spire.eu/sites/siderwin.drupal.pulsartecnalia.com/files/documents/SIDERWIN_project_estad2019.pdf. ArcelorMittal Maizières, França, parceiros siderwin. 2020 (Acesso em: 07/06/2023 às 7h30).

MIDREX H2. Ajudando siderúrgicas a reduzir as emissões de CO₂. Disponível em: <https://www.midrex.com/technology/midrex-process/midrex-h2/>. 2021 (Acesso em 10/06/2023 às 6h).

Primetals Technologies Ltd, Áustria, Brochure No.: T01-0-N001-L4-P-V5-EN. Disponível em: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/finex/the_finex_process.pdf. 2020. (Acesso em: 04/06/2023).

Y.E. Lee. Ferroalloys: Production and use in Steel-making, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferroalloy> (Acesso em 16/06/2023 às 23h).

