



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



ANA LAURA MEDEIROS ALVES

Revisão da literatura sobre o processo de produção de ferro silício (FeSi)

UBERLÂNDIA
2025

ANA LAURA MEDEIROS ALVES

Revisão da literatura sobre o processo de produção de ferro silício (FeSi)

Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira

UBERLÂNDIA
2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Faculdade de Engenharia Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br

**ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO**

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	FEQUI31033 – Trabalho de Conclusão de Curso				
Data:	08/05/2025	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	08:50
Matrícula do Discente:	11921EQU005				
Nome do Discente:	Ana Laura Medeiros Alves				
Título do Trabalho:	Revisão da literatura sobre o processo de produção de Ferro Silício (FeSi)				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?		(X) Sim () Não			

Reuniu-se por webconferência a Banca Examinadora, assim composta pelo professor Ricardo Amâncio Malagoni, engenheiro mestre e técnico-administrativo Diego de Sousa Bernardes e professor Luiz Gustavo Martins Vieira (orientador). Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, prof. Luiz Gustavo Martins Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público e concedeu à discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada - Nota (90)

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Gustavo Martins Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/05/2025, às 08:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Amâncio Malagoni, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/05/2025, às 08:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diego de Sousa Bernardes, Assistente em Administração**, em 09/05/2025, às 08:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6317245** e o código CRC **8E867524**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus que esteve comigo em cada passo dessa jornada desafiadora, mas gratificante que foi a graduação. Aos meus pais, Josiane e Wander, não há palavras suficientes para expressar minha gratidão a vocês. Vocês sempre estiveram ao meu lado me dando todo o apoio necessário para que eu pudesse seguir meu sonho de me tornar Engenheira Química. Vocês são a minha maior inspiração e motivação e graças a vocês nunca desisti de lutar pelos meus sonhos. Ao meu irmão, Daniel, muito obrigada por me apoiar inclusive nos dias mais difíceis. Ter você como irmão me motiva a cada dia a me tornar uma pessoa melhor.

Aos meus avós, Ambrósio, Marly, José Antônio e Maria José, sou eternamente grata pelo apoio e amor incondicional que sempre me deram. Vô Ambrósio, vô Zé e vó Lia embora não estejam mais fisicamente entre nós, os ensinamentos e o legado que deixaram continuam vivos em cada passo que dou. Este título também é fruto de tudo o que me ensinaram ao longo da vida.

Aos meus amigos, em especial Ana Gabriela Martins Silva e Lucas Macedo Silva, que se tornaram parte da minha família. Vivemos muitas histórias juntos como nos momentos de estudos, almoços no PET e até mesmo nos momentos de desespero. Pudemos criar memórias inesquecíveis e sempre levarei elas comigo por onde for. A amizade de vocês é um dos maiores tesouros que a UFU me proporcionou. Ao meu namorado, Marco Antônio, meu muito obrigada por me incentivar e apoiar durante esta jornada.

À ConsultEQ, meu sincero agradecimento por todo o aprendizado e desenvolvimento que tive. Aos meus professores, em especial Luiz Gustavo Martins Vieira, obrigada pelo seu suporte durante a elaboração desse trabalho. Saiba que é uma das minhas principais referências de professor na UFU com sua didática impecável além do ser um ser humano incrível que é.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e por terem me acompanhado nesta jornada. Mãe, pai, irmão, familiares e amigos saibam que esse título também é de vocês!

***“O sucesso não é sobre ser melhor que os outros,
é sobre ser melhor do que você era ontem”***

Wayne Dyer

RESUMO

Dentre os segmentos metalúrgicos, destaca-se a metalurgia de transformação que consiste nos processos para obtenção do produto com maior valor agregado. Tais processos tem como foco de atuação a modificação das propriedades dos metais por meio de processos físicos, químicos e mecânicos. A adição de ligas metálicas, geralmente ferroligas, são utilizadas para melhorar as propriedades como a resistência, dureza, ductilidade e resistência à corrosão. Essas ligas são compostas principalmente de ferro e pelo menos um elemento de liga como o manganês, silício, cromo, níquel e entre outros. O ferro silício (FeSi) é uma das ligas mais consumidas com ampla aplicação e é utilizada como fonte de silício para outros processos como a redução metalotérmica, desoxidação de aço, fabricação de silício metálico e na produção de outras ligas. Os tipos mais comuns possuem 15%, 45%, 75% e 90% de silício, sendo o restante percentual composto por ferro e outros elementos como alumínio e cálcio. O FeSi é produzido através da redução carbotérmica de sílica e óxido de ferro em fornos elétricos a arco submerso. As matérias-primas comumente utilizadas são quartzo, carvão ou coque metalúrgico e uma fonte de ferro. O tipo de forno comumente utilizado para a produção de ferro silício é o forno a arco elétrico de corrente alternada com três eletrodos dispostos de forma triangular. Esses eletrodos ficam submersos na carga e tem como objetivo direcionar a corrente elétrica até a carga. A zona de reação pode chegar até 2000°C e ocorre na extremidade dos eletrodos exigindo-se o posicionamento adequado. Após o processo reacional tem-se o metal fundido e a escória que são removidos por meio de canais que são abertos e fechados constantemente no fundo do forno. Embora seja um processo com baixa geração de escória a formação da mesma ocorre devido às impurezas presentes nas matérias-primas como óxido de alumínio, cálcio e entre outros que não foram reduzidos adequadamente. Adicionalmente, em alguns casos é necessário realizar o refino do material para controlar os elementos indesejados. Por fim, esse trabalho teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre o processo de produção de ferro silício a fim foi possível de compreender as particularidades deste processo produtivo.

Palavras-chave: Ferroligas; Ferro silício; Redução carbotérmica; Forno elétrico a arco submerso.

ABSTRACT

Among the metallurgical segments, transformation metallurgy stands out, which consists of processes to obtain products with greater added value. These processes focus on modifying the properties of metals through physical, chemical and mechanical processes. The addition of metal alloys, usually ferroalloys, is used to improve properties such as strength, hardness, ductility and corrosion resistance. These alloys are composed mainly of iron and at least one alloying element such as manganese, silicon, chromium, nickel and others. Ferrosilicon (FeSi) is one of the most widely used alloys and is used as a source of silicon for other processes such as metallothermal reduction, steel deoxidation, manufacturing of metallic silicon and in the production of other alloys. The most common types have 15%, 45%, 75% and 90% silicon, with the remaining percentage composed of iron and other elements such as aluminum and calcium. FeSi is produced through the carbothermic reduction of silica and iron oxide in submerged arc electric furnaces. The commonly used raw materials are quartz, coal or metallurgical coke, and an iron source. The type of furnace commonly used for the production of ferrosilicon is the alternating current electric arc furnace with three electrodes arranged in a triangular shape. These electrodes are submerged in the load and are intended to direct the electric current to the load. The reaction zone can reach up to 2000°C and occurs at the end of the electrodes, requiring proper positioning. After the reaction process, the molten metal and slag are removed through channels that are constantly opened and closed at the bottom of the furnace. Although it is a process with low slag generation, slag formation occurs due to impurities present in the raw materials, such as aluminum oxide, calcium, and others, which were not adequately reduced. Additionally, in some cases it is necessary to refine the material to control unwanted elements. Finally, it was possible to understand the particularities of this production process, but the need for technological innovation and current scientific research is highlighted so that there is greater competitiveness and sustainability of this production.

Keywords: Ferroalloys; Ferrosilicon; Carbothermic reduction; Submerged arc electric furnace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de ferroligas e silício metálico associadas ABRAFE.....	2
Figura 2: Representação de um forno a arco submerso com três eletrodos.....	9
Figura 3: Fluxograma do processo de produção de ferro silício.....	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise química do carvão vegetal	6
Tabela 2. Consumo para produção de uma tonelada de ferro silício	7
Tabela 3. Principais composições químicas das ligas de FeSi.....	12
Tabela 4. Composição química da escória de ferro silício (FS) e resíduos de alumina (AW) ...	15

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. METODOLOGIA.....	4
4. REVISÃO	5
4.1. MATÉRIA-PRIMA	5
4.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO	8
4.3. RESÍDUOS	15
5. CONCLUSÃO	17
REFERÊNCIAS.....	18

1. INTRODUÇÃO

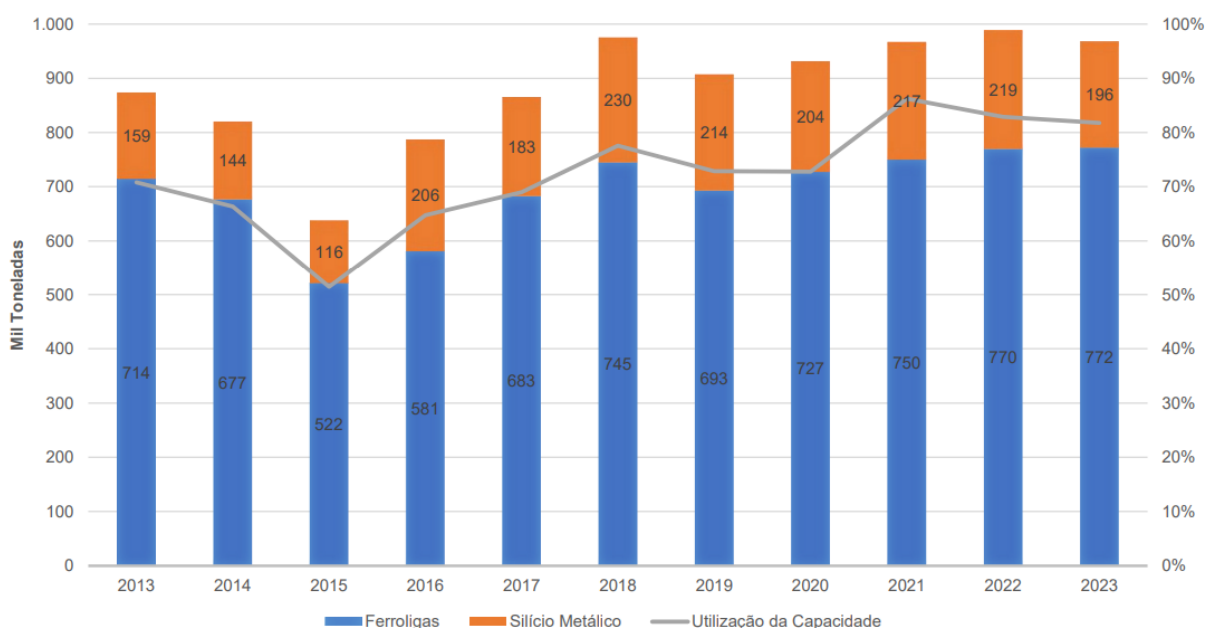
Segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE, 2024), a indústria metalúrgica é composta pelos seguimentos de metais não ferrosos, fundição, siderurgia, produção de tubos de aço, produção de ferro-gusa e ferroligas. Esses seguimentos podem ser classificados em metalurgia extrativa e de transformação (WEI, MENG e XU, 2024). A metalurgia extrativa é baseada nos processos de extração dos metais a partir dos minérios. Tais elementos metálicos extraídos são utilizados como insumos para os processos de transformação. Dessa forma, a metalurgia de transformação se baseia nos processos para obtenção do produto final com maior valor agregado (STEIN *et al.*, 2022).

A metalurgia extrativa refere-se aos processos de extração e refino dos metais a partir de minérios através de processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e eletrometalúrgicos (RIBEIRO *et al.*, 2018). A pirometalurgia é um processo realizado sob altas temperaturas com o objetivo de facilitar a extração dos metais desejados reduzindo a estabilidade química dos compostos metálicos. Esse processo possui três principais etapas sendo: a calcinação, ustulação e fusão (SANTOS, 2015). Já eletrometalurgia é um processo comumente utilizado para extrair e refinar metais não ferrosos. Além disso, pode ser operado sob baixas ou altas temperaturas e é realizado a partir da eletrólise para dissociar os metais em uma cuba eletrolítica com um condutor iônico conhecido como eletrólito. Durante esse processo, os íons positivos (cátions) são atraídos para o cátodo onde se depositam como átomos neutros. Por fim, a hidrometalurgia baseia-se na dissolução de ligas metálicas em soluções aquosas como a água ou os ácidos minerais para recuperar ou concentrar os metais. Essa técnica é aplicável tanto a ímãs oxidados como não oxidados (STEIN *et al.*, 2022).

Já a metalurgia de transformação tem como objetivo a modificação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais metálicos. Tais propriedades podem ser determinadas por diversos fatores como a composição química, a estrutura cristalina e os processos de fabricação. Dentre estes fatores, a estrutura cristalina determina propriedades como a dureza, ductilidade e condutividade elétrica. As principais classificações da estrutura cristalina dos metais são a cúbica de face centrada (CFC), a cúbica de corpo centrado (CCC) e a hexagonal compacta (HC). Uma estratégia amplamente utilizada para o aprimoramento dessas propriedades é a adição de ligas metálicas durante o processo produtivo. As ligas metálicas conhecidas como ferroligas são compostas principalmente por ferro e por pelo menos um elemento de liga como o manganês, silício, cromo, níquel, dentre outros. Geralmente esse material é adicionado a metais fundidos

com o objetivo de melhorar algumas propriedades como resistência à corrosão. Dessa forma, a adição ligas pode modificar de forma significativa o comportamento de um metal base. Por exemplo, o aço é uma liga de ferro e carbono cuja resistência mecânica é superior à do ferro puro (RIBEIRO *et al.*, 2018). A Figura 1 ilustra a evolução da produção de ferroligas no Brasil na última década, atingindo 772 mil toneladas em 2023.

Figura 1. Produção de ferroligas e silício metálico associadas ABRAFE.



Fonte: ABRAFE (2024).

Dentre as ferroligas, o ferro silício (FeSi) é uma das ligas mais consumidas atualmente e com ampla aplicação na indústria metalúrgica. Por exemplo, nos processos de redução metalotérmica é utilizada como fonte redutora para extração dos metais a partir dos óxidos. Além disso, pode ser utilizada como agente desoxidante na produção do aço bem como matéria-prima na fabricação de silício metálico e outras ligas. O FeSi é composto majoritariamente pelos elementos silício e ferro. Os tipos mais comuns possuem 15%, 45%, 75% e 90% de silício sendo o restante percentual composto por ferro e outros elementos como alumínio e cálcio. O silício pertence ao grupo IV da tabela periódica com um peso atômico de 28,08 e a rede de silício tem uma estrutura cúbica de face centrada (CFC). Esse é o segundo elemento mais abundante na litosfera da Terra e está disponível na natureza na forma de sílica (dióxido de silício) e silicatos. Já o ferro tem uma estrutura cúbica de corpo centrada (CCC) e é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre. Esse elemento pode ser encontrado na forma de minério de ferro (hematita, goethita ou magnetita) e de ganga que não possui valor econômico (DUARTE, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre o processo de produção de ferro silício.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1. Avaliar a possibilidade de reaproveitamento dos resíduos gerados;

2.2.2. Compreender as particularidades do processo de produção de ferro silício.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado através de um levantamento bibliográfico realizado a partir de uma seleção de artigos científicos e livros publicados entre 2014 e 2025, com exceção de alguns artigos publicados (1992-1998) por baixa disponibilidade na literatura. Para tal, foi utilizado as seguintes bases de dados científicos: Periódicos CAPES, Science Direct, SciFinder e Google acadêmico.

Durante as pesquisas foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “produção de ferro silício”, “ferroligas”, “processo metalúrgico”, “forno a arco elétrico”, “subprodutos do ferro silício”; “refino de ferro silício”. A partir da seleção de diversos artigos e de alguns livros base, construiu-se uma revisão da literatura sobre o processo de produção de ferro silício, analisando-se desde o fluxograma de produção até o reaproveitamento de resíduos.

4. REVISÃO

4.1.MATÉRIA-PRIMA

O ferro silício é produzido através da redução carbotérmica de sílica e óxido de ferro em fornos elétricos a arco submerso. As matérias-primas comumente utilizadas são quartzo, carvão ou coque metalúrgico e uma fonte de ferro (ETEMADI, KOOHESTANI e TAJALLY, 2023).

O dióxido de silício (SiO_2) conhecido como sílica é um composto químico resultante da combinação entre oxigênio e silício que pode ser encontrado na natureza tanto na forma cristalina quanto amorfa. A sílica cristalina pode ser encontrada em três formas principais sendo o quartzo, a cristobalita e a tridimita. O quartzo α é a forma estável encontrada na natureza e é a principal matéria-prima para o processo de produção. É fundamental conhecer sua composição química como, por exemplo, os teores de alumínio (Al), titânio (Ti), fósforo (P), ferro (Fe) e cálcio (Ca) (GASIK, 2013).

Além disso, é necessário que também seja conhecido as características granulométricas bem como a resistência mecânica e térmica deste material. Já a tridimita é um polimorfo de sílica formado sob altas temperaturas sendo frequentemente encontrado em rochas ígneas que se resfriaram rapidamente impedindo que houvesse sua transformação em quartzo. Por isso, a tridimita é encontrada em rochas vulcânicas siliciosas como os riólitos. A cristobalita β pode coexistir de maneira metaestável com o quartzo e a tridimita até temperaturas entre 200 e 275°C. Em temperaturas superiores à 275°C, o quartzo e a tridimita tendem a se converter em cristobalita β podendo se manter metaestável até a temperatura ambiente. A cristobalita β se estabiliza a partir de 1470°C (GOMES, FURTADO e SOUZA, 2018).

Já a matéria-prima empregada no processo de redução é uma fonte de carbono sendo as principais utilizadas o carvão mineral, carvão vegetal ou coque de petróleo. O carvão mineral possui em sua composição química o carbono, oxigênio, hidrogênio, enxofre e resíduos minerais (cinzas). A qualidade dessa matéria-prima é determinada principalmente pelo percentual de carbono contido e pode ser encontrada na natureza como turfa, linhito, hulha e antracito (COSMO *et al.*, 2020).

A turfa possui teor de carbono entre 55% e 60% e é o estágio inicial do carvão mineral. Por outro lado, o linhito contém entre 67% e 78% de carbono e é utilizado principalmente para geração de energia elétrica devido ao seu baixo poder calorífico e rápida deterioração. Já a hulha possui entre 80% e 90% de carbono a qual se origina da fossilização da madeira soterrada e é comumente utilizada em fornos de usinas termoeletricas bem como na produção de coque. Por

fim, o antracito com 96% de carbono possui uma combustão mais lenta e é frequentemente destinado ao uso doméstico. Além disso, devido à baixa quantidade de impurezas o antracito também é recomendado para o tratamento de água (COSMO *et al.*, 2020).

Já o carvão vegetal possui um grau de pureza superior ao do carvão mineral devido ao baixo teor de enxofre, cinzas e contaminantes. É um subproduto resultante da pirólise da madeira, que geralmente se utiliza eucalipto em decorrência de suas propriedades químicas, físicas e baixo custo. A umidade da madeira influencia diretamente na qualidade do carvão uma vez que quanto maior a umidade mais frágil e quebradiço será o carvão produzido. Já o alto teor de carbono fixo é uma das principais vantagens do carvão vegetal, pois está diretamente relacionado ao seu poder calorífico. Esse teor depende do processo de carbonização e do conteúdo de lignina presente na madeira (FROEHLICH e MOURA, 2014).

O aumento do carbono fixo resulta em maior reatividade durante o processo de combustão de modo a facilitar a interação do combustível sólido com o dióxido de carbono. A reatividade é o fator determinante do carvão vegetal para este ser utilizado como redutor, pois quanto maior a reatividade maior a cinética da combustão e, conseqüentemente, maior geração de gás redutor da carga metálica (CO) (FROEHLICH e MOURA, 2014). A temperatura final de carbonização é o principal fator que afeta os teores de carbono fixo e de materiais voláteis do carvão vegetal conforme Tabela 1.

Tabela 1. Análise química do carvão vegetal.

Material	Temperatura de carbonização (°C)	Análise química Imediata base seca (%)		
		Carbono fixo	Materiais voláteis	Cinzas
Eucaliptus Grandis 5,5 anos	450	75,06	21,03	3,91
	550	86,53	10,12	3,33
	700	89,82	7,20	2,93

Fonte: Adaptado de FROEHLICH e MOURA (2014).

O coque metalúrgico é produzido a partir do carvão hulha que é derivado dos processos de secagem, pirólise, fusão, ligação, cura e encolhimento. Esse processo ocorre sob condições de isolamento de oxigênio e nas temperaturas entre 950 e 1050°C. É um material poroso não homogêneo contendo carbono orgânico e minerais inorgânicos (NIU *et al.*, 2024).

Já o coque verde de petróleo (CVP) é uma alternativa derivada da destilação do petróleo. Essa matéria-prima é caracterizada como um produto sólido resultante da destilação do petróleo originado do craqueamento das frações ou óleos residuais pesados nas Unidades de Conversão

de Resíduos (UCRs). As UCRs visam à destruição de resíduos da destilação de petróleo com o objetivo de gerar derivados mais leves. Existem dois tipos principais de CVP sendo o tipo esponja e o tipo agulha. O tipo esponja representa cerca de 90% da produção global e é produzido a partir de óleos residuais de destilação a vácuo. Já o tipo agulha é derivado do processamento de óleos aromáticos pesados oriundos de processos de conversão térmica ou catalítica. Por fim, o coque metalúrgico tende a gerar mais emissões de gases de efeito estufa bem como um custo superior ao coque verde de petróleo. No entanto, o coque verde de petróleo pode ter uma qualidade inferior e com uma menor eficiência em termos energéticos (FERREIRA e PINHO, 2004).

Já o ferro é encontrado na natureza principalmente na forma cristalina e disposto em forma de óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos. Os minerais predominantes na natureza são hematita, goethita e magnetita. A hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) é o minério de ferro com maior disponibilidade na natureza. Em temperaturas abaixo de 250 K este minério apresenta um arranjo antiferromagnético enquanto em temperatura ambiente possui comportamento fracamente ferromagnético. Já a goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) exibe um comportamento antiferromagnético. A magnetita (Fe_3O) é um óxido de ferro de valência mista (DUARTE, 2019).

Na fabricação de ligas de ferrossilício, o ferro adicionado é principalmente como sucata, embora ocasionalmente uma pequena escala de resíduo fino do minério de ferro pode ser utilizada. A sucata de ferro também deve estar isenta de elementos como cobre, estanho, cromo, níquel etc. O minério de ferro raramente é usado pois tende a formar escória com a sílica antes que o ferro seja completamente reduzido bem como pode introduzir elementos indesejados no processo como fósforo, cálcio e alumínio (SEETHARAMAN, 2014). Por fim, a Tabela 2 demonstra o consumo esperado dos principais insumos considerando uma tonelada de ferro silício produzido.

Tabela 2. Consumo para produção de uma tonelada de ferro silício.

	FeSi 20%	FeSi 25%	FeSi 45%	FeSi 65%	FeSi 75%
Quartzo (kg)	370	552	931	1568	1930
Sucata de ferro (kg)	810	780	658	343	250
Coque (kg)	200	280	438	720	845
Pasta eletródica (kg)	10	8	16	43,3	54
Energia elétrica (MWh/t)	2,1	2,7	4,8	7,4	8,8

Fonte: Adaptado de GASIK (2013).

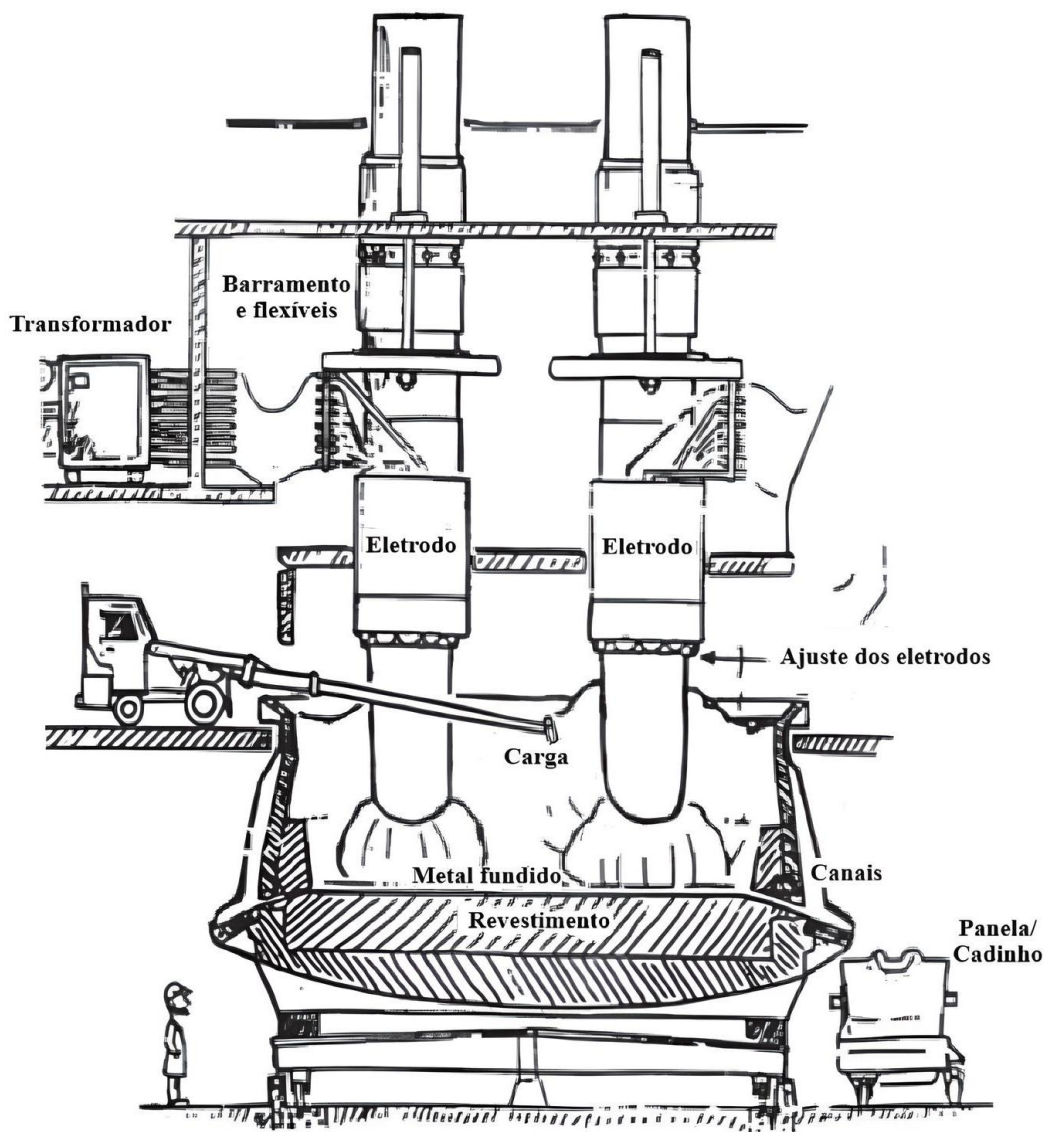
4.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO

A produção de ferroligas ocorre principalmente em fornos a arco elétrico. Há dois tipos principais: o forno a arco de corrente direta e o de corrente alternada. Estes fornos podem ser operados de forma contínua, batelada ou semibatelada. O princípio de funcionamento é baseado nas propriedades do arco elétrico para fundir o material em uma cuba termicamente isolada por material refratário. O arco elétrico é um plasma de alta temperatura que pode alcançar até 20000K. Esse arco eleva a temperatura da carga do forno para a faixa de 1800 a 2000°C e é gerado pela passagem de corrente elétrica entre os eletrodos que recebem energia de um único transformador trifásico ou de três transformadores monofásicos tendo como meio ionizado o ar (GASIK, 2013).

O tipo de forno mais utilizado para a produção de ferro silício é o de corrente alternada com três eletrodos dispostos de forma triangular. Esses eletrodos têm a função de direcionar a corrente elétrica até a carga do forno de modo a ficarem submersos na mesma. O *design* típico deste forno está representado na Figura 2, o qual é composto por uma carcaça cilíndrica com um fundo plano com o interior revestido com camadas de carbono. Esse tipo de revestimento se deve ao fato de que as ligas com alto teor de silício não absorvem carbono em quantidade significativa. O revestimento de carbono pode ser através de blocos de carbono pré-cozidos ou por pasta de carbono compactada e cozida. Por fim, o restante do forno é normalmente revestido com tijolos refratários (GASIK, 2013).

A zona de reação ocorre na extremidade dos eletrodos e por isso exige-se o posicionamento adequado dos mesmos durante o processo de produção. A corrente alternada aplicada aos eletrodos provoca uma corrente elétrica entre as extremidades dos eletrodos através da carga criando uma zona de reação com temperaturas que podem alcançar até 2000°C. Para garantir uma carga elétrica constante a profundidade dos eletrodos deve ser ajustada automaticamente por meios mecânicos ou hidráulicos. Os arcos de baixa voltagem e alta corrente nas pontas dos eletrodos geram uma zona de alta temperatura e baixo potencial de oxigênio. A maior parte da energia é transferida para a carga por aquecimento resistivo, efeito Joule, devido à corrente elétrica. A capacidade de condução dos eletrodos é determinada pela condutividade elétrica do material e o diâmetro dos eletrodos (MACHULEC, GIL e BIALIK, 2017).

Figura 2. Representação de um forno a arco submerso com três eletrodos.



Fonte: Adaptado de HAUKSDOTTIR, GESTSSON e VESTEINSON (1998).

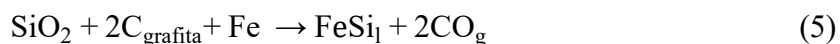
Na produção de ferroligas são utilizados dois tipos principais de eletrodos sendo os autocozidos (Søderberg) e os pré-cozidos. O eletrodo Søderberg consiste em um invólucro de aço e um núcleo de carbono. O invólucro é um tubo de aço com aletas que é usado como suporte para a pasta de carbono. A pasta é composta por antracito calcinado ou uma mistura de carvão com coque e piche, além de que esta possui baixa condutividade elétrica e é alimentada no topo da estrutura para formar o eletrodo. Durante o processo de cozimento, 350 a 500°C, a pasta passa por mudanças de modo a elevar as propriedades de condução elétrica e resistência mecânica permitindo que o eletrodo suporte altas correntes e temperaturas durante a produção. As condições operacionais podem afetar a qualidade do eletrodo possibilitando dois principais

gargalos de processo sendo a quebra dura na pasta cozida ou quebra verde na pasta não cozida (GASIK, 2013).

As quebras duras podem ocorrer por tensões térmicas, subcozimento, supercozimento, forças mecânicas desequilibradas ou segregação da pasta. Para corrigir esse tipo de quebra, o forno é operado com carga reduzida e são feitos deslizamentos mais longos para restaurar o comprimento do eletrodo. Além disso, é necessário que haja a garantia de que o eletrodo esteja totalmente cozido antes de restabelecer a corrente total, uma vez que, caso esse procedimento não seja realizado adequadamente, pode ocorrer a quebra verde. Esse tipo de quebra pode causar danos ao forno, pois o material não cozido é despejado direto na soleira do forno (GASIK, 2013).

Já os eletrodos pré-cozidos possuem um elevado custo, considerando que estes possuem um processo de cozimento controlado para garantir uma qualidade uniforme minimizando a probabilidade de quebras durante a operação. Estes são fabricados a partir de fontes de carbono e um ligante de piche. O grau de carbono utilizado influencia diretamente o nível de grafitação do eletrodo. Os eletrodos de carbono antracito e semigrafite estão disponíveis em diâmetros que variam de 700 mm a 1400 mm. Por outro lado, os eletrodos de grafite apresentam condutividade elétrica maior e por isso é possível o uso de altas densidades de corrente. Esses eletrodos estão disponíveis no mercado em diâmetros que variam de 150 mm a 800 mm. Devido à sua alta condutividade elétrica, os eletrodos de grafite são ideais para fornos de corrente contínua. Por fim, como a pasta do eletrodo Söderberg é menos condutiva do que o grafite, a densidade de corrente que pode ser sustentada por este eletrodo é menor do que a de um eletrodo de grafite (GASIK, 2013).

As principais reações de redução dos elementos advindos das matérias-primas:



As reações de redução (1) a (4) ocorrem em função da composição química dos insumos utilizados para a produção. Já a reação 5 é a reação global do processo de produção do FeSi. A reação 1 inicia-se em 1500°C e finaliza até 1800°C. Os pontos de fusão das ligas de ferro silício são mais baixos do que os do ferro (<1400°C) e como a temperatura de redução é significativamente superior ao ponto de fusão, não há dificuldades em realizar o processo de

vazamento dos fornos. Durante a fabricação, as ligas de ferro silício absorvem gases principalmente o hidrogênio de modo que, quando fundidas, é comum que o lingote apresente furos de sopro devido à liberação deste gás durante a solidificação. Isso é especialmente perceptível em ligas com 75% de Si. Como a temperatura de vazamento é geralmente bem acima da temperatura de solidificação, as ligas com 45%, 75% e 95% de Si possuem uma tendência à segregação gravitacional nos lingotes, porém com baixa tendência à desintegração. Dessa forma, em um mesmo lingote pode-se chegar a uma variação de até 20% e quanto maior o tempo de solidificação, maior a segregação. Para evitar isso, o ferro silício é normalmente fundido em grandes placas planas com a espessura máxima de 100 mm, a fim de acelerar o resfriamento (SEETHARAMAN, 2014).

Após o processo reacional tem-se o metal fundido e a escória que são removidos por meio de canais que são abertos e fechados constantemente no fundo do forno. Embora seja um processo com baixa geração de escória a formação da mesma ocorre devido às impurezas presentes nas matérias primas como óxido de alumínio, cálcio e entre outros que não foram reduzidos adequadamente. Além disso, uma baixa disponibilidade do redutor na carga pode acarretar uma maior geração de escória e por isso indica-se que seja utilizado cerca de 10 a 15% em excesso estequiométrico (SENAPATI, MAHESWAR e RAY, 2007)



A partir das reações (6), (7) e (8) pode-se avaliar que se a carga não reduzir completamente, haverá SiO_2 e SiC em excesso e serão concentrados na escória juntamente com as outras impurezas elevando a geração de escória. Esse caso pode ocorrer por falta de disponibilidade de carbono no processo ou temperatura insuficiente no processo reacional. A escória possui uma alta viscosidade (30-35 P) e alta temperatura de fusão em torno de 1700°C. A composição da escória é heterogênea com maior percentual de silicato (48% a 50% de SiO_2 , 20% a 25% de Al_2O_3 , 15% a 18% de CaO) e carbeto de silício em suspensão SiC (10% a 15%) (SEETHARAMAN, 2014).

Em decorrência dessa característica o processo de vazamento do metal e escória é dificultado. Para facilitar, pode-se adicionar teores de CaO e CaF_2 para reduzir a viscosidade da escória e facilitar o vazamento junto ao metal. Geralmente os canais de vazamento são abertos em um intervalo de 1 a 5 h por um período de 10 a 15 min. O metal fundido e a escória fluem para uma panela revestida de material refratário e seguido do processo de lingotamento. Após o vazamento, a escória é removida da superfície do metal fundido na panela e pode ser

reaproveitada para outros fins como lastro rodoviário ou como insumo para outros processos. (SEETHARAMAN, 2014) (VAISH, 1994)

Adicionalmente, em alguns casos é necessário realizar o refino do material para controlar os elementos indesejados. Por exemplo, o FeSi 75% é o mais utilizado nos processos industriais. Além disso, este pode ser classificado de duas formas principais sendo o padrão (Standard) e o de alta pureza (HP). O ferro silício 75% Standard é amplamente utilizado na indústria siderúrgica e em fundições como aditivo desoxidante e elemento de liga na produção de aço.

O uso deste insumo melhora as propriedades do aço como resistência à tração, elasticidade, resistência ao recozimento e à oxidação em altas temperaturas. Já o ferro silício 75% de alta pureza é essencial para a fabricação de aços especiais, especialmente os usados em equipamentos elétricos como transformadores, geradores e núcleos magnéticos. Para uso em aços elétricos, o ferro silício precisa ter baixo teor de impurezas como alumínio, cálcio e carbono, pois esses elementos em forma de óxidos prejudicam as propriedades magnéticas. A diferença entre os dois tipos de FeSi está no controle das impurezas desde a matéria-prima até a necessidade de um refino mais acentuado. Por exemplo, o Ca e Al são menos nobres que Si e possuem maior afinidade com oxigênio e por isso podem ser removidos por oxidação. Enquanto o teor de ferro só pode ser controlado limitando-o na matéria-prima seja no quartzo, na fonte de carbono dentre outros (TUSET, 1992). Na Tabela 3 estão representadas as principais composições químicas das ligas de FeSi.

Tabela 3. Principais composições químicas das ligas de FeSi.

	% em peso								
	Si	Al	P	S	C	Mn	Ti	Ca	
FeSi 10%	8-13	<0,2	0,15	0,06	2	3	0,3		Balanço de massa
FeSi 15%	14-20	<1			1,5	1,5			
FeSi 25%	20-30	<1,5			1	1			
FeSi 45%	41-47	<2	0,05	0,05	0,2	1	0,3		
FeSi 50%	47-51	<1,5		0,05		0,8			
FeSi 65%	63-68	<2		0,04		0,4			
FeSi 75% STD	74-79	<2	0,015-0,03	<0,001-0,005	0,05-0,15		0,07-0,1	0,2-0,8	
FeSi 75% HP	74-79	<0,06			<0,02		<0,02	<0,02	
FeSi 90%	87-95%	<1,5	0,04	0,04	0,15	0,5	0,3		

Fonte: Adaptado de TUSET (1992) e GASIK (2013).

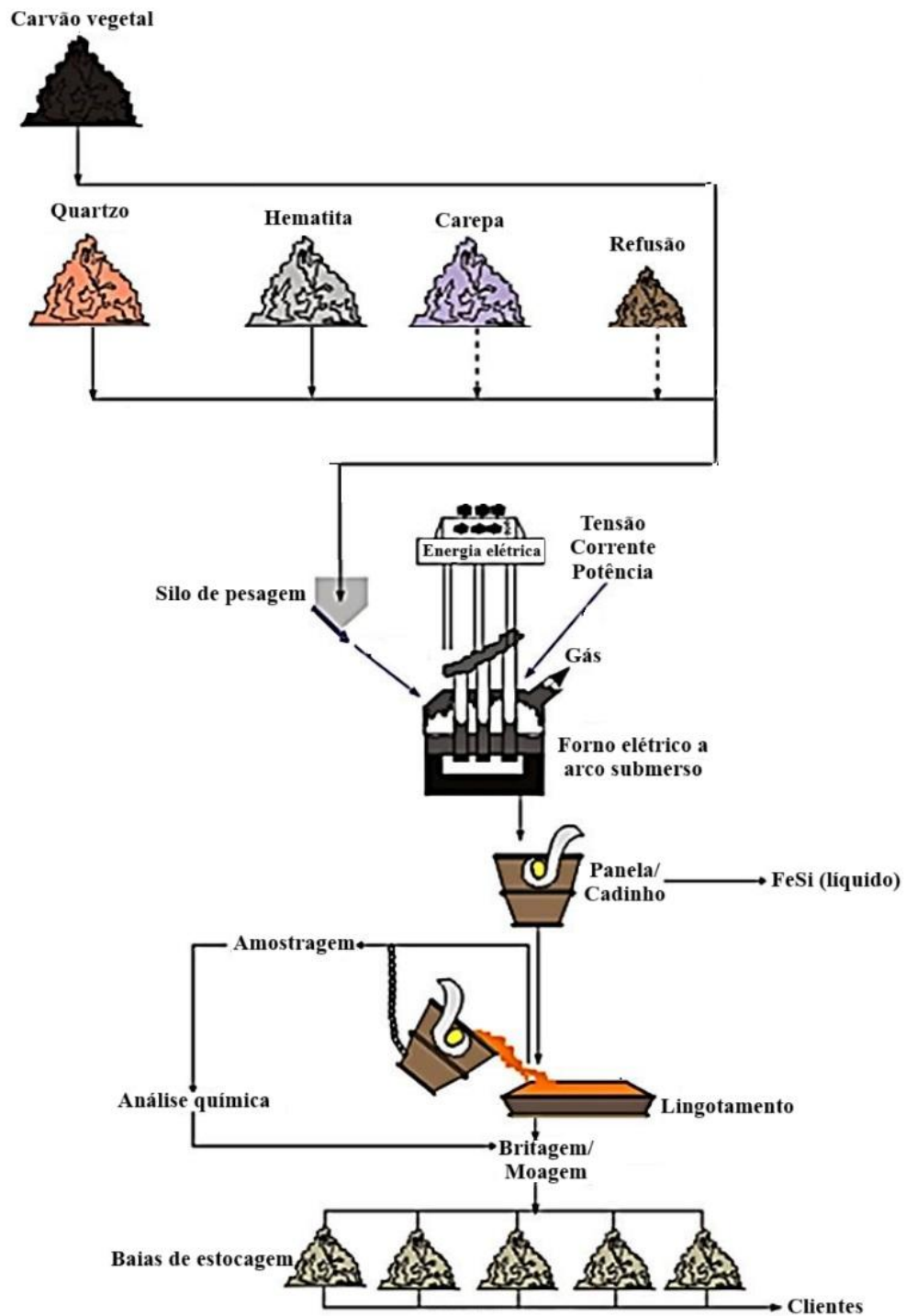
O método de refino com oxigênio consiste no uso deste gás puro com um inerte ou o ar enriquecido por oxigênio. Esse fluxo é acoplado por meio de um plugue no fundo da panela para promover agitação e facilitar a oxidação das impurezas. Em um estudo realizado, obteve-se uma melhor eficiência quando a taxa de oxigênio foi de 1 a 2 vezes maior que a de argônio (inerte). No entanto, o processo apresenta limitações sendo que os teores de alumínio e cálcio nas ligas com (74 a 76% de Si) não devem ultrapassar 0,45% e 0,20%, respectivamente.

O outro método de refino é através da injeção de dióxido de carbono junto à cal que atua como fundente para formar escória. Os óxidos de alumínio, cálcio e silício reagem e formam uma escória composta por CaO , Al_2O_3 , 2SiO . A escória possui uma densidade menor que a do metal e por isso flutua e é removida através da superfície da panela. No entanto, o uso de CO_2 pressurizado gera um efeito de resfriamento significativo acarretando na formação de acúmulos sólidos. O tempo total do processo de refino é de aproximadamente 47 a 48 min (BHATTACHARYA, 1994).

Ademais, os elementos químicos no forno com menor temperatura de ebulição tendem a se concentrar na fase gasosa, os que possuem uma temperatura de ebulição ligeiramente mais alta são condensados na microsilica ou aglomerados na escória e aqueles com o ponto de ebulição mais altos se concentram no metal. A microsilica é formada a partir da reação entre O_2 e o gás SiO que foi evaporado para a parte superior do forno e esse subproduto é coletado por filtros de tratamento para minimizar os impactos ambientais (GASIK, 2013).

Na Figura 3 está representado o fluxograma geral de produção onde as matérias-primas são pesadas no silo e adicionadas ao forno de acordo com o balanço de massa. Durante a produção, os gases gerados são coletados e, após o processo reacional, o material é vazado na panela. Logo em seguida, esse material é ligotado, amostrado e analisado quimicamente para atender os padrões de qualidade exigidos pelo consumidor final.

Figura 3. Fluxograma do processo de produção de ferro silício.



Fonte: Adaptado de UFOP (2020).

4.3. RESÍDUOS

A formação de subprodutos é inerente ao processo de produção e os principais são a escória e a microsilica. A composição química destes resíduos irá variar de acordo com as condições operacionais de cada indústria. Uma aplicação da escória é na produção de tijolos geopoliméricos para isolamento térmico. Esta alternativa visa a substituir os materiais convencionais como argila e xisto, que são ecologicamente prejudiciais e requerem alto consumo de energia.

A escória de ferrossilício apresenta baixo teor de alumina e por isso é necessário adição de alumina. Os geopolímeros são produzidos a partir de resíduos industriais ricos em aluminossilicatos com uma solução alcalina concentrada, o que resulta em um material de alta estabilidade com estrutura polimérica amorfa. Em muitos casos, os materiais de partida dos geopolímeros são deficientes em aluminossilicato, o que exige a adição de outros componentes para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas, especialmente quando a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Si/Al) é baixa.

Sob condições alcalinas, o silício livre presente na escória é oxidado liberando gás H_2 e forma-se espumas geopoliméricas. As espumas geopoliméricas podem ser preparadas a temperaturas abaixo de 100°C e possuem características semelhantes às espumas de vidro ou cerâmica que exigem temperaturas acima de 900°C . Estas espumas têm sido aplicadas para materiais resistentes ao fogo, isolantes térmicos e painéis de parede.

A escória de ferrossilício é pobre em Al_2O_3 , o que exige adição de fontes de alumina como os resíduos de alumina (AW) para compensar essa deficiência. A alumina é um material sem custo significativo e oferece bom desempenho como material de construção pois tem alta refratariedade, resistência à compressão e estabilidade térmica. A escória estudada possui a composição química descrita na Tabela 4 (AHMED *et al.*, 2021).

Tabela 4. Composição química da escória de ferro silício (FS) e resíduos de alumina (AW)

Composição química (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	F_2O_3	SO_3	Cl
FS	77,70	3,45	11,50	1,96	0,14	0,11	0,26	0,35	0,07	0,39	0,06
AW	2,62	64,5	0,46	0,47	8,31	0,13	4,29	3,61	-	0,42	9,82

Fonte: Adaptado de AHMED, M. M. *et al* (p.4, 2021)

Uma segunda aplicação da escória é na substituição da argila *caulim* na composição de telhas de argila resultando em maior resistência, durabilidade e resistência ao choque térmico por

essa modificação. Os resultados experimentais indicaram que a incorporação de 15% de escória e com o processo de queima a uma temperatura de 1000°C resultaram em um aumento significativo de 34,9% na resistência à ruptura transversal das telhas de barro quando comparadas à amostra convencional. Este subproduto possui uma quantidade significativa de silicato, o qual leva à formação de silicatos vítreos que funcionam como fundentes de modo a reduzir as temperaturas de maturação. Dessa forma, isso reduz a quantidade de energia gasta nesse processo de maturação acarretando uma vantagem competitiva desse produto (AHMED *et al.*, 2023).

Outro subproduto gerado é a microsílica que é captada pelos filtros de tratamento e possui baixo valor agregado. A microsílica gerada é composta principalmente de SiO₂ amorfo fino além de outros óxidos como MgO, K₂O, Fe₂O₃ e ZnO. É um material extremamente fino como um pó branco e com baixa solubilidade em água. Como a maior parte da microsílica é composta de SiO₂ amorfo fino e altamente reativo, é possível produzir SiO₂ amorfo a partir da microsílica por meio da calcinação, dissolução alcalina e precipitação ácida. A sílica amorfa gerada foi usada em um estudo para preparar compósitos de sílica e dióxido de titânio. Esse estudo apresentou resultados positivos quanto à melhora das propriedades de pigmentação, podendo ser utilizado como um insumo na fabricação de papel, revestimentos e plásticos. O poder de cobertura do composto de sílica amorfa/TiO₂ atingiu 15,75 g/m² em uma proporção de 50% e isso corresponde a 70,53% do poder de cobertura do TiO₂ puro. O insumo TiO₂ puro possui um alto valor agregado e com esse estudo pode-se obter uma redução de custo significativo nos ramos industriais que utilizam esse insumo (LIANG *et al.*, 2023).

Por fim, uma pesquisa demonstrou uma aplicação do nanoferrosilício (NFS), o qual melhorou as propriedades de proteção contra radiação no concreto pesado de alta performance. Esse concreto é usado em estruturas radiológicas para evitar a propagação e transmissão de radiação. Fontes de raios gama e raios X representam risco à saúde humana e para mitigar isso, há pesquisas com foco na melhoria da blindagem do concreto utilizando materiais como fibra, nanoferrosilício e entre outros. O concreto de ultra alta performance com alta densidade e resistência é ideal para blindagem. O uso de nanomateriais com nanopartículas menores que 500 nm melhoram a densidade e propriedades mecânicas. Além disso, a combinação de 3% de NFS e magnetita resultou nos valores máximos de densidade e coeficiente de atenuação de raios gama avaliados. O ferro silício melhorou a resistência à compressão além de outras propriedades como: a resistência à tração por fissuração, resistência à flexão e módulo de elasticidade (HENIEGAL *et al.*, 2022).

5. CONCLUSÃO

A partir do que foi apresentado foi possível compreender as particularidades do processo de produção de ferro silício. Esse produto é fabricado por meio da redução carbotérmica do quartzo em fornos elétricos a arco submerso. É um processo que demanda um controle rigoroso de qualidade quanto a composição química das matérias-primas e das condições operacionais do forno. A presença de impurezas como o alumínio impactam o uso deste em algumas aplicações, por exemplo o FeSi 75% HP na produção de aços elétricos.

Além disso, pode-se concluir que quanto maior o teor de silício maior será a quantidade de quartzo e menor o percentual de ferro. E por isso, com o aumento do teor de Si maior será o consumo da pasta de eletrodo, uma vez que 50% do consumo do eletrodo é para a redução dos óxidos (VAISH, 1994). Ademais, o consumo de energia elétrica será elevado e, por consequência disto, maior será o valor agregado nesse material. De um modo geral, para que o processo ocorra de modo eficiente é necessário que haja um balanço de massa adequado, um posicionamento correto dos eletrodos, uma porosidade adequada da carga e condições necessárias para um bom vazamento do metal.

Por fim, pôde-se verificar a relevância do uso do ferro silício no mundo atual, mas destaca-se a necessidade de inovação tecnológica e pesquisas científicas atuais para que haja uma maior competitividade e sustentabilidade deste processo produtivo.

REFERÊNCIAS

ABRAFE - Associação Brasileira dos Produtores de Ferro Silício e Silício Metálico. *Anuário estatístico 2024*. Disponível em: <https://www.abrafe.ind.br/publicacoes/>. Acesso em: 3 abr. 2025.

AHMED, M.M.; KASSIM, A.; RAGAB, A.; EL-RAZAZ, Z.; AL-ENIZI, A.M.; YOUSEF, A.; ABDELRADY, A.; K.A.M. EL-NAGGAR, K.A.M. Enhanced strength, durability, and thermal shock resistance of clay roof tiles substituted with ferrosilicon slag. **Journal of King Saud University. Science**, v. 35, n. 8, p. 102855, 2023.

AHMED, M. M.; EL-NAGGAR, K. A. M.; TAREK, D.; RAGAB, A.; SAMEH, H.; ZEYAD, A. M.; TAYEH, B. A.; MAAFA, I. M.; YOUSEF, A. Fabrication of thermal insulation geopolymer bricks using ferrosilicon slag and alumina waste. **Case studies in construction materials**, v. 15, p. e00737, 2021.

BHATTACHARYA, A.P. **Refining of ferro-silicon**. National Metallurgical Laboratory. Refresher Course on Ferro Alloys, Jamshedpur, 1994.

CNAE - Classificação Nacional de Atividades Econômicas. *IBGE, 2024*. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/?view=divisao&tipo=cnae&versao=10&divisao=24&chave=metalurgia>. Acesso em: 3 set. 2024.

COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M.; NOVAKOSKI, F. P.; RICINI, B.M. Carvão mineral. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 4, n. 1, 2020.

DUARTE, H. Ferro – Um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Química nova**, v. 42, n. 10, p. 1146–1153, 2019.

ETEMADI, A.; KOOHESTANI, H.; TAJALLY, M. The effect of different carbon reductants on the production of ferrosilicon 75% on an industrial scale in an electric arc furnace. **Heliyon**, v. 9, n. 3, p. e13956, 2023.

FERREIRA, G. M.; PINHO, L. F. P. Utilização do coque de petróleo como insumo energético. **ABM Proceedings**. São Paulo: Editora Blucher, 2004.

FROEHLICH, P.L; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. Rio Grande do Sul. **Feevale**, 2014.

GASIK, M. **Handbook of ferroalloys: Theory and technology**. Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 2013.

GOMES, L.; FURTADO, A. C. R.; DE SOUZA, M. C. A sílica e suas particularidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 4, p. 1018–1038, 2018.

HAUKSDOTTIR, A.S, GESTSSON, A., VESTEINSON, A. Submerged-arc ferrosilicon simulator: validation for different furnaces and operating ranges. **Control Engineering Practice**. 6, p. 1035-1042. 1998.

HENIEGAL, A.M.; AMIN, M.; NAGIB, S. H.; YOUSSEF, H.; AGWA, I. S. Effect of nano ferrosilicon and heavyweight fine aggregates on the properties and radiation shielding of ultra-high performance heavyweight concrete. **Case studies in construction materials**, v. 17, n. e01543, p. e01543, 2022.

LIANG, Y.; ZHANG, H.; DING, H.; SUN, S.; WANG, Y.; BAI, X.; LI. Amorphous silica: Prepared by byproduct microsilica in the ferrosilicon production and applied in amorphous silica-TiO₂ composite with favorable pigment properties. **Journal of materials research and technology**, v. 26, p. 235–245, 2023.

MACHULEC, B.; GIL, S.; BIALIK, W. Similarity of ferrosilicon submerged arc furnaces with different geometrical parameters. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 62, n. 4, p. 2343–2347, 2017.

NIU, W.; LI, Y.; LI, Q.; WANG, J.; WANG, G.; ZUO, H.; SHE, X.; XUE, Q. Haibin. Physical and chemical properties of metallurgical coke and its evolution in the blast furnace ironmaking process. **Fuel** (London, England), v. 366, n. 131277, p. 131277, 2024.

RIBEIRO, J. P. C.; GODOI, P. J. P. M.; BATISTA, F. D.; CORREA, P.M. **Tecnologia metalúrgica**. Porto Alegre: Grupo A, 2018. E-book. ISBN 9788595025936. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025936/>. Acesso em: 22 set. 2024.

SANTOS, G. A. **Tecnologia dos Materiais Metálicos - Propriedades, Estruturas e Processos de Obtenção**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2015. E-book. ISBN 9788536532523. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536532523/>. Acesso em: 22 set. 2024.

SEETHARAMAN, S. **Treatise on process metallurgy, volume 3: Industrial processes**. [s.l.] Elsevier, 2014.

SENAPATI, D.; MAHESWAR, E.V.S.U.; RAY, C.R. Ferro silicon operation at imfa – a critical analysis. **International Ferro-Alloys Congress XI (INFACON)**. India, 2007.

STEIN, R. T.; SOUZA, T. F.; GONÇALVES, F. M.; PINTO, L. N. O.; SILVA, L.A.; BARBOSA, N.A. **Tratamento de Minérios**. Porto Alegre: Grupo A, 2022. E-book. ISBN 9786556903446. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556903446/>. Acesso em: 05 set 2024.

TUSET, J.K.S. The refining of silicon and ferrosilicon. Proceedings of the 6th International **Ferroalloys Congress**. Cape Town. Vol 1. Johannesburg, SAIMM, 1992, pp. 193-199.

UFOP- Universidade Federal de Ouro Preto. MET 163-Eletrometalurgia, Aula 6- Ferro Silício. Ouro Preto, 2020.

VAISH, A.K. Production of Ferro-Silicon and Calcium Silicon Alloys. National Metallurgical Laboratory. **Refresher Course on Ferro Alloys**, Jamshedpur, 1994.

WEI, R.; MENG, K.; LONG, H.; XU, C.C. Biomass metallurgy: A sustainable and green path to a carbon-neutral metallurgical industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 199, n. 114475, p. 114475, 2024.