



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



GUILHERME JESUS FERREIRA

FERROSILÍCIO DE ALTA PUREZA PARA AÇOS ELÉTRICOS:

Uma abordagem sobre a influência da composição química e a importância do refino na
produção do ferrosilício destinado a aços elétricos

UBERLÂNDIA

2025

GUILHERME JESUS FERREIRA

FERROSILÍCIO DE ALTA PUREZA PARA AÇOS ELÉTRICOS:

Uma abordagem sobre a influência da composição química e a importância do refino na
produção do ferrosilício destinado a aços elétricos

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

Orientador: Prof^a. Dra. Miria Hespanhol
Miranda Reis

UBERLÂNDIA

2025

GUILHERME JESUS FERREIRA

FERROSILÍCIO DE ALTA PUREZA PARA AÇOS ELÉTRICOS:

Uma abordagem sobre a influência da composição química e a importância do refino na produção do ferrosilício destinado a aços elétricos

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

Orientador:

UBERLÂNDIA , 12 DE MAIO DE 2025.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Miria Hespanhol Miranda Reis – FEQUI-UFU

Prof^a. Dr^a. Lidiane Pereira Bessa – IQD - UnB

Eng^o. Me. Kristopher Rodrigues Dorneles – PPGEQ - UFU

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo
estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar forças nos momentos os quais eu não via mais esperança, sem ele não teria chegado até o fim dessa jornada. Agradeço aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional durante todo o processo, especialmente aos meus pais por acreditarem e investirem em mim, o título que conquistarei também é de vocês! Agradeço a minha namorada por estar sempre ao meu lado durante todo esse período de graduação, sempre escutando meus anseios e me incentivando a não desistir.

Nessa jornada fiz grandes amigos que levarei pra vida, a eles deixo minha profunda gratidão por dividirem o peso da graduação comigo, sem a nossa união nada disso seria possível.

Agradeço à minha orientadora, Miria Hespanhol Miranda Reis, por me acolher como orientando nesse trabalho e como coorientando de iniciação científica durante a graduação. Sem dúvida, a realização deste trabalho não seria possível sem os conhecimentos termodinâmicos que me foram transmitidos por ela.

Agradeço também, à professora Juliana de Souza Ferreira por me acolher como orientando de iniciação científica em duas pesquisas durante toda a graduação, além de me abrir portas para o mundo da metalurgia, fator que me levou a fazer o trabalho em questão.

“Passado um longo caminho, eu percorri.”

Mestre Yoda

RESUMO

O ferrosilício (FeSi) é uma matéria prima amplamente utilizada na indústria do aço, desempenhando papel de desoxidante durante a produção do mesmo. Já os aços elétricos, são um tipo especial de aço capazes de conduzir um campo magnético e amplificar o mesmo, além de apresentarem baixas perdas magnéticas durante seu ciclo de magnetização. Tal material é amplamente utilizado na fabricação de núcleos de motores e transformadores, podendo ser do tipo grão orientado (GO) ou não orientado (GNO). Para que as propriedades magnéticas do aço elétrico sejam otimizadas, é imprescindível a presença de silício em sua composição em teores de até 3,5% em massa, uma vez que o silício age na diminuição das perdas magnéticas por correntes parasitas. Por isso, os aços elétricos são também conhecidos como aços siliciosos. Ainda nesse âmbito, é essencial o controle de alguns elementos como alumínio e carbono na composição do aço silicioso, uma vez que os mesmos influenciam o crescimento dos grãos que compõem a estrutura cristalográfica do aço, sendo que o tamanho dos grãos influencia as perdas magnéticas. Por isso, as aciarias demandam um produto de alta pureza das produtoras de ferrosilício, contendo teores de silício de aproximadamente 75% e teores de alumínio e carbono menores que 0,02%. Dessa forma, para que se atinja tais especificações, o ferrosilício é submetido a um processo de refino, uma etapa na qual uma corrente rica em oxigênio permeia o banho metálico de FeSi e remove através de oxidação os metais com maior afinidade ao oxigênio, como o Al e Ca. O carbono é removido a taxas menores, uma vez que o mecanismo de remoção do mesmo é diferente ao do que ocorre com os metais.

Palavras-chave: aço elétrico; ferroligas; ferrosilício; metalurgia; refino.

ABSTRACT

Ferrosilicon (FeSi) is a widely used raw material in the steel industry, playing a key role as a deoxidizer during steel production. Electrical steels are a special type of steel capable of conducting and amplifying a magnetic field, while exhibiting low magnetic losses during their magnetization cycle. This material is extensively used in the manufacture of motor and transformer cores and may be classified as grain-oriented (GO) or non-oriented (NGO). To optimize the magnetic properties of electrical steel, the presence of silicon in amounts up to 3.5 wt.% is essential, as silicon reduces magnetic losses caused by eddy currents. Therefore, electrical steels are also known as silicon steels.

In this context, it is crucial to control elements such as aluminum and carbon in the composition of silicon steel, since they influence the grain growth in the steel's crystallographic structure, and grain size directly affects magnetic losses. For this reason, steel mills require a high-purity product from ferrosilicon producers, with silicon content of approximately 75% and aluminum and carbon contents lower than 0.02%. To meet these specifications, ferrosilicon undergoes a refining process, a stage in which an oxygen-rich gas stream permeates the FeSi metal bath and removes, through oxidation, metals with a higher affinity for oxygen, such as Al and Ca. Carbon, on the other hand, is removed at lower rates, since its removal mechanism differs from that of metallic elements.

Keywords: electrical steels; ferroalloys; ferrosilicon, metallurgy, refining process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1.1 - Elementos de um motor elétrico	14
Figura 3.1.2 –Tamanho de grão e perdas magnéticas.....	17
Figura 3.1.3 – Tamanho de grão e fração Al.....	18
Figura 3.1.4 – Propriedades magnéticas típicas de aços siliciosos.....	19
Figura 3.1.5 – Características garantidas de um aço elétrico da empresa APERAM.....	19
Figura 3.1.6 – Efeito do teor de silício nas perdas elétricas totais para aços submetidos a induções da 1,0 e 1,5T.....	20
Figura 3.1.7- Perdas por histerese (Ph), excedente (Pe) e total (Pt) em função do tamanho de grão (g) para 4 tipos de amostras de aço baixo carbono 3%Si.....	21
Figura 3.2.1- Valor médio da tonelada de FeSi 75 em diferentes regiões da China (Yuan[¥]/t).	23
Figura 3.2.2- Valor médio da tonelada de Si Metal em diferentes regiões da China (Yuan[¥]/t).	23
Figura 3.2.3- Forno circular com três eletrodos arranjados de forma triangular.....	25
Figura 3.2.4 - Esquema de um forno a arco elétrico para produção de ferroligas.....	26
Figura 3.2.5- Fluxograma do processo produtivo de ferroligas.	27
Figura 3.2.6 - Esquema da situação da região ao redor de um eletrodo.....	28
Figura 3.2.7 - Reações que ocorrem em cada zona da cavidade do eletrodo.	30
Figura 3.2.8 - Análise EPMA de amostras de eferentes regiões da parede da cavidade do eletrodo: parte superior (a) e parte inferior (b).	31
Figura 3.3.1- Tipo de aço elétrico e o tipo de ferrosilício ELKSIL® utilizado.	34
Figura 3.3.2 – Diagrama de Ellingham.....	36
Figura 3.3.3 - Diagrama esquemático do refino com sopro pelo fundo da panela.....	37
Figura 3.3.4 - Diagrama de equilíbrio entre metais dissolvidos e seus óxidos a 1550 °C.....	38
Figura 3.3.5 - Descarbonização de um banho metálico de Si a 1600 °C.....	39
Figura 3.3.6 - Esquematização dos fenômenos interfaciais que ocorrem na transferência de C.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.2-1 - Diferentes parâmetros para um forno a arco elétrico.....	26
Tabela 3.2-2 – Entalpia de formação para algumas ligas líquidas – FeSi a 1600°C.	32
Tabela 3.2-3 – Efeito da presença de ferro na formação de silício metálico.....	32
Tabela 3.3-1 - Composições químicas típicas de ferrosilício de diferentes empresas.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo Geral	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2 METODOLOGIA.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Visão geral sobre o aço elétrico	14
3.1.1 Magnetismo	15
3.1.2 Perdas elétricas	16
3.2 Visão geral sobre ferroligas	22
3.2.1 Produção de ferrosilício	24
3.2.2 Zonas de reação que ocorrem no forno.....	28
3.2.3 Redução da sílica	29
3.2.4 Redução de óxidos ferrosos	32
3.2.5 Redução de outros elementos	33
3.3 Refino de ferrosilício	33
3.3.1 Remoção de cálcio e alumínio do banho metálico	35
3.3.2 Remoção de carbono do banho metálico	38
4 CONCLUSÃO.....	41
5 REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A indústria do aço atual busca entregar ao mercado produtos cada vez mais específicos de acordo com a demanda de seus clientes. Entre os setores que demandam por aços especiais, destaca-se o setor elétrico. É fato que recursos energéticos se tornam cada vez mais escassos e caros no mundo, por isso busca-se a maior eficiência energética possível nos sistemas elétricos e é nesse contexto que surge a necessidade de aços elétricos como matéria prima na construção de núcleos de transformadores e motores elétricos.

Aços elétricos não conduzem corrente elétrica, mas sim um fluxo magnético (BOHN, GÜNDL, *et al.*, 2004). Nesse âmbito, o aço elétrico alcança baixas perdas magnéticas devido sua alta permeabilidade magnética, por isso é capaz de diminuir desperdícios de energia aumentando a eficiência energética dos motores e transformadores que o utilizam. Contudo, para alcançar tais características o material passa por um rigoroso controle de alguns elementos em sua composição, sendo alguns deles: carbono, alumínio, titânio e fósforo, capazes de interferir negativamente nas propriedades magnéticas do material. Por outro lado, um elemento essencial na composição das ligas de aço elétrico é o silício, que chega a compor cerca de 3% da massa do aço (CAMPOS, 2009).

Nesse cenário, é imprescindível utilizar matérias primas livres de contaminantes, uma vez que muitos deles não podem ou são dificilmente purgados durante o processo de fabricação do aço elétrico. Assim, surge um desafio para o setor de ferroligas e silício metálico, os grandes responsáveis por suprir a matéria prima chave (silício) para as aciarias fabricarem seus produtos.

Segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e Silício Metálico (ABRAFE, 2025), as empresas brasileiras de ferroligas e silício metálico produziram cerca de 968 mil toneladas de material em 2023, sendo que 51,4% desse material foi exportado, uma contribuição de 2,3% no superávit da balança comercial brasileira em 2023. Um dos produtos largamente comercializado por esse setor é o ferro silício de alta pureza, *High Purity* (FeSi-HP) que é justamente o material livre de contaminantes que as aciarias procuram para a fabricação de aços elétricos. Tal produto se trata de uma liga metálica de ferro com silício, contendo majoritariamente silício, que varia na faixa de 65 a 75% (m/m) sendo o balanço o elemento ferro. Os contaminantes se encontram presentes em quantidades mínimas, na casa de ppm: Ca máximo 0,06%, Al máximo 0,02%, Ti máximo 0,04%, P máximo 0,011% (todos valores de porcentagem mássica, m/m) (TUSET, 1992). Contudo, a obtenção desse produto com contaminantes limitados a quantidades tão pequenas é um grande desafio para o setor das

ferroligas, e muitas vezes, somente um controle rigoroso de matérias primas é capaz de purgar o contaminante do produto final, porém em alguns casos não é possível se obter matérias primas livre dos elementos indesejados e, por isso, se faz necessário a aplicação de técnicas de refino durante o processo produtivo.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho busca trazer, através de uma revisão bibliográfica, diferentes técnicas que podem ser empregadas para remover elementos indesejados da liga de FeSi-HP, mostrando o sentido físico-químico de cada método e sua efetividade relatada na literatura.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Entender o impacto de alguns elementos na performance do aço elétrico.
- b) Entender o processo produtivo do FeSi-HP.
- c) Explanar diferentes técnicas que podem ser utilizadas para retirar elementos indesejados do FeSi-HP.

2 METODOLOGIA

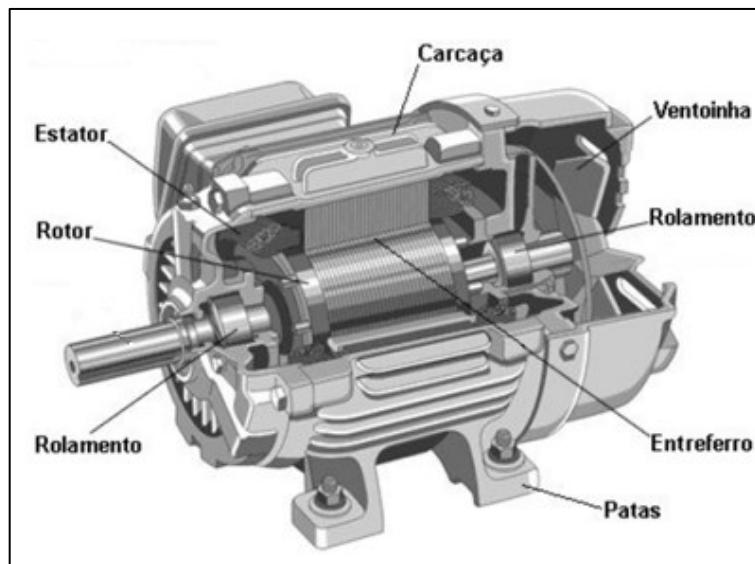
Será realizada uma revisão bibliográfica através de buscas nos bancos de dados: Biblioteca UFU, Wiley, Science Direct, Scielo, Banco de teses e dissertações, Portal de Periódicos da CAPES e Google Scholar, a fim de encontrar trabalhos que elucidem as influências da composição química nas propriedades magnéticas de um aço elétrico e como o processo de refino durante a produção de ferrosilício deve ser conduzido para garantir uma matéria prima livre de contaminantes que viabilize a produção dos aços siliciosos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Visão geral sobre o aço elétrico

Aços elétricos, ou aços siliciosos, destacam-se dos demais devido a sua capacidade de amplificar um campo magnético externamente aplicado, fenômeno conhecido como permeabilidade magnética (μ). Assim, dizer que um aço possui uma permeabilidade magnética de 5000 significa que o mesmo amplifica em 5000 vezes o campo magnético nele aplicado. Tal propriedade é importante para eficiência de motores elétricos por exemplo, uma vez que está diretamente relacionada com a intensidade do torque do motor: quanto maior o campo magnético gerado no entreferro, região entre o rotor e o estator, ilustrado na Figura 3.1.1, maior o torque do motor (LANDGRAF, 1999).

Figura 3.1.1 - Elementos de um motor elétrico



Fonte: FRANCISCO (2006, p. 2).

De acordo com Cullity e Graham (2008) o magnetismo de determinado material se relaciona com o alinhamento dos momentos magnéticos atômicos dos átomos que constituem esse material: seus elétrons desemparelhados se alinham coletivamente tornando o material magnético. Assim, em compostos químicos que apresentam forte magnetismo, magnetita por exemplo (Fe_3O_4), ocorre um alinhamento quase perfeito dos momentos magnéticos dos átomos ao longo de toda região da estrutura cristalográfica do material e é justamente isso que faz com que suas propriedades magnéticas sejam fortes. Contudo, em algumas ligas metálicas (aços

elétricos, por exemplo) há regiões pontuais de alinhamento ao longo da estrutura cristalográfica, tais regiões são chamadas de “domínios magnéticos”, que quando submetidas a um campo magnético externo se alinharam formando um monodomínio magnético que faz com que o material apresente propriedades magnéticas. Além disso, quando se trata de ligas de aço (Fe-C) há de se atentar a maneira como os átomos de ferro estão conformados, uma vez que a forma alotrópica ferrita (α -Fe) é ferromagnética, ao passo que a forma austenita (γ -Fe) não é (MARRA; MARRA; BUONO, 2016), por isso é necessário um controle da microestrutura do aço durante sua fabricação, o que pode ser feito através da adição ou retirada de alguns elementos químicos do banho metálico, ou por manipulação de algumas etapas durante o processo. No trabalho em questão o foco maior será dado para o controle de composição química do aço, uma vez que o refino de ferroligas é crucial para que seja possível se controlar a composição do aço nas aciarias.

3.1.1 Magnetismo

O magnetismo é mensurado por algumas propriedades eletromagnéticas intrínsecas a cada material: a indução magnética (B), que é a medida da intensidade do campo magnético no interior do material, tendo em vista que esse campo foi induzido por um campo externamente aplicado (H) (LANDGRAF, 1999). A indução magnética é medida em gauss (G, sistema CGS) ou, mais usualmente, em tesla (T, sistema MKS) assim como o campo magnético externo, responsável pela indução, que também é medido usualmente em tesla (T). Portanto, a permeabilidade magnética (μ) é dada pela fórmula apresentada na equação 3.1-1:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.1-1)$$

De acordo com as informações apresentadas até aqui, conclui-se que para o melhor funcionamento de um motor elétrico é desejável a utilização de materiais que apresentem a maior indução magnética possível. Entretanto, segundo Landgraf (1999) o valor desse parâmetro é limitado pela existência de uma saturação magnética (2,15 T no caso do elemento ferro) e pela intensidade da corrente elétrica necessária para levar o material até o nível de indução magnética desejada. O autor ainda destaca que a maior indução magnética já registrada foi a de uma liga de Fe-35% Co atingindo um valor de 2,4 T. Nesse exemplo, nota-se como a presença de alguns elementos na liga de aço pode influenciar nas propriedades magnéticas da mesma, assunto que será abordado posteriormente nesse trabalho.

Quando se trata da direção do campo magnético induzido no aço silicioso, o mesmo pode apresentar diferenças a depender da microestrutura da chapa de aço, que se relaciona com forma como a mesma foi produzida (relacionado com o processo de laminação do aço), podendo ser de grão orientado ou não orientado. Aços de grão orientado (GO) possuem alta anisotropia, ou seja, suas propriedades magnéticas são excelentes em apenas uma direção: a direção da laminação do material, e tal característica faz com que os mesmos sejam muito utilizados na construção de geradores e transformadores, equipamentos nos quais o campo magnético pode ser montado sempre na direção longitudinal da chapa de aço (APERAM, 2025; JÚNIOR, 2023). Por outro lado, os aços de grão não orientado (GNO) apresentam baixa anisotropia: o campo magnético induzido no material possui mesma intensidade em diferentes direções. Por isso, tal tipo de aço é mais utilizado na construção de estatores e rotores de motores elétricos, pelo fato de os mesmos exigirem um fluxo magnético que mude de direção durante o funcionamento (rotação) do motor. Ressalta-se que a aplicação de aços siliciosos em motores é a que mais consome o material disponível no mercado (LANDGRAF, 1999).

3.1.2 Perdas elétricas

Outro parâmetro essencial na análise do desempenho de um aço silicioso são as perdas elétricas ocorridas no material, sendo as perdas magnéticas uma parcela considerável dentro das perdas elétricas totais. Tal fenômeno ocorre devido à dissipação de energia em forma de calor durante o ciclo de magnetização de aços elétricos. Portanto, o mercado de componentes elétricos busca por aços que apresentem alta permeabilidade magnética e baixas perdas magnéticas.

A perda magnética total (P_t), dada em W/kg ou em J/m³, é resultado da soma de três parcelas de perda, de acordo com a equação 3.1-2, sendo totalmente influenciada pela estrutura cristalográfica do aço, que pode ser influenciada pela composição química do mesmo:

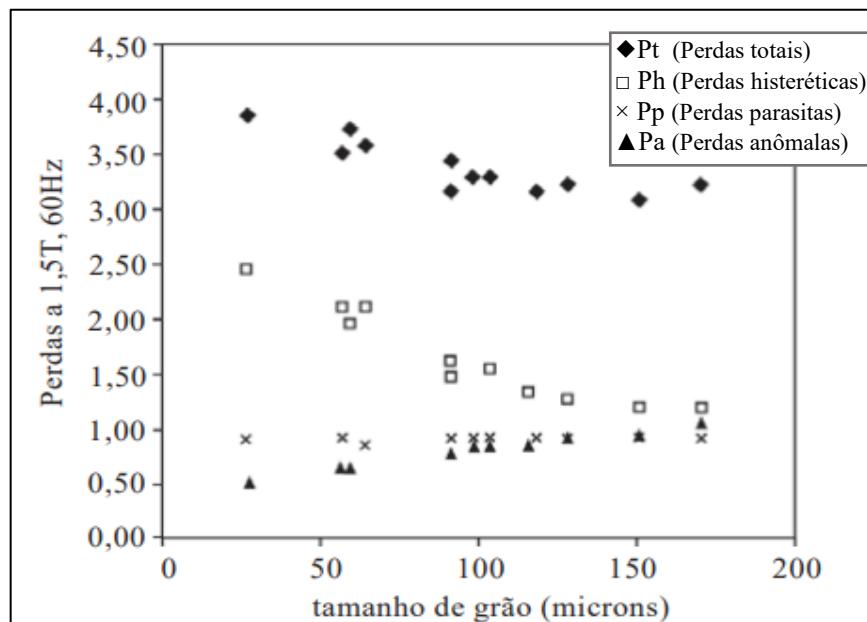
$$P_t = Ph + Pp + Pa \quad (3.1-2)$$

sendo Ph a perda por histerese, Pp a perda por correntes parasitas e Pa as perdas anômalas.

Assim, é possível relacionar determinados tipos de perdas com a presença de certos tipos de elementos na liga metálica. Um exemplo é a perda de energia por histerese (Ph), que é o resultado de uma energia residual liberada após o fenômeno de histerese magnética, o qual toda liga magnética está submetida durante seu ciclo de magnetização. Tal parcela de perda é muito

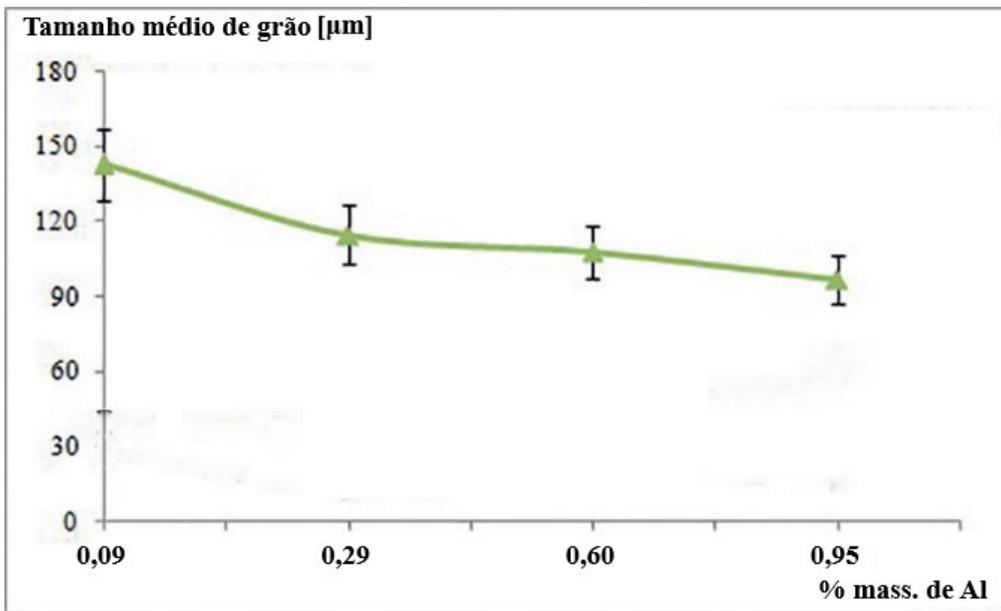
sensível a microestrutura do aço, sendo influenciada pelo tamanho e orientação dos grãos que compõe o mesmo: quanto menores os grãos, maior será a perda por histerese no material, como é apresentado na Figura 3.1.2, na qual Cunha, Paolineli e Cesar (2001) associam o tipo e a intensidade da perda magnética com o tamanho de grão, evidenciando a relação destacada anteriormente. A fim de se controlar o tamanho de grão e favorecer a formação de uma microestrutura ferrítica (magnética) no aço, utiliza-se o elemento alumínio (MARRA; MARRA; BUONO, 2016). O gráfico apresentado na Figura 3.1.3 apresenta uma relação do tamanho de grãos com a fração mássica de alumínio na liga de aço e fica evidente como os grãos tendem a diminuir com a adição do mesmo. Tal efeito é causado pela ancoragem do composto AlN nos contornos dos grãos do aço, o que limita o crescimento dos mesmos (ANJOS, 2010). Portanto o controle de tal elemento na liga de aço é essencial para se otimizar as propriedades magnéticas.

Figura 3.1.2 –Tamanho de grão e perdas magnéticas.



Fonte: Adaptado de Cunha; Paolinelli; Cesar (2001).

Figura 3.1.3 – Tamanho de grão e fração Al.



Fonte: Adaptado de Marra; Mara; Buono (2016).

As perdas por correntes parasitas (P_p) são causadas pela circulação das chamadas correntes de Foucault ao longo do núcleo ferromagnético (JÚNIOR, 2023), sendo que o trânsito dessas correntes acaba gerando uma dissipação de energia por efeito Joule, que é quantificada segundo a equação 3.1-3.

$$P_p = \frac{\sigma \pi^2 e^2 f^2 B_m}{6} \quad [W/m^3] \quad (3.1-3)$$

onde e é a espessura das chapas, f a frequência e B_m a indução magnética máxima (JÚNIOR, 2023)

Nota-se que chapas de espessura mais fina sofrem menos com o efeito da circulação das correntes parasitas, dissipando menos energia. Por isso, utilizam-se lâminas de aço para formar o núcleo de motores ao invés de utilizar uma única chapa espessa, para que não haja um aumento na condutividade elétrica do núcleo, o que contribuiria para as perdas segundo a Equação 3.1-3, as lâminas recebem um tratamento superficial que faz com que haja um isolamento elétrico entre as mesmas.

No intuito de se reduzir a condutividade elétrica do aço, e consequentemente as perdas por correntes parasitas, um elemento muito utilizado é o silício, pois o mesmo é capaz de aumentar a resistividade elétrica do aço, o que resulta em maior dificuldade de passagem de elétrons pelos cristais do material, resultando na diminuição da condutividade elétrica das chapas de aço.

Chiaverini (1988) elencou em seu livro valores típicos de propriedades magnéticas para chapas de aço silicioso. Estes valores foram dispostos em uma tabela, apresentada na Figura 3.1.4, e mostram como a resistividade elétrica da chapa de aço aumenta com o aumento do teor de silício, resultando na diminuição das perdas elétricas máximas. Os valores típicos apresentados por Chiaverini (1988) se mostram coerentes quando confrontados com a ficha técnica de aços elétricos do fornecedor APERAM (2025) que é apresentada na Figura 3.1.5.

Figura 3.1.4 – Propriedades magnéticas típicas de aços siliciosos.

Teor de aproximado de Si, %	Tipo ou Marca	Resistividade micro-ohms-cm	Perda do núcleo máxima (watts-kg em 60 ciclos)
0,25/0,30	“Campo”	28	5,1
0,50/0,60	“Armadura”	28	3,4
1,25/1,50	“Elétrico”	44	3,7
2,50/2,75	“Motor”	44	2,5
2,75/3,25	“Dinâmo”	50	2,1
3,25/3,50	“Hipersil”	50	2,1
3,60/4,00	“Transformador 72”	52	1,58
4,00/4,25	“Transformador 65”	58	1,43
4,25/4,50	“Transformador 58”	60	1,27
4,50/4,75	“Transformador 52”	65	1,15

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1988).

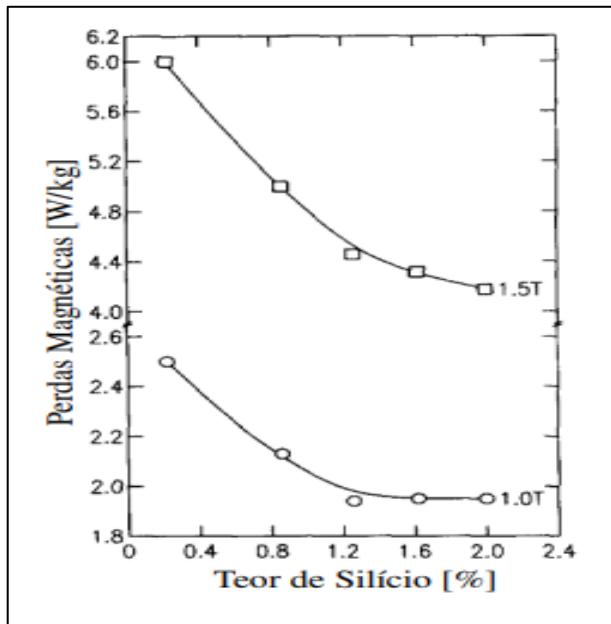
Figura 3.1.5 – Características garantidas de um aço elétrico da empresa APERAM.

Características Garantidas													
Referência	Aperam	Espessura (mm)	Perda Magnética Máxima a* (W/kg)				Indução Magnética Mínima a (T)			Densidade Assumida (g/cm³)	Teor de Silício (%)		
			1,0 T		1,5 T		2.500 A/m	5.000 A/m	10.000 A/m				
			50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz							
M530-50A	E230-8		2,30	2,91	5,30	6,66							
M470-50A	E185-4		2,00	2,30	4,70	5,90							
M400-50A	E170-6		1,70	2,15	4,00	5,10	1,59	1,69	1,79	7,75	2,0		
M370-50A	E157-3		1,60	2,10	3,70	4,70							
M350-50A	E145-8		1,50	2,05	3,50	4,45							
M330-50A	E137-5	0,50	1,35	1,80	3,30	4,20							
M310-50A	E125-0		1,25	1,60	3,10	3,95							
M290-50A	E115-1		1,15	1,45	2,90	3,71	1,56	1,65	1,76	7,65	3,0 a 3,3		
M270-50A	E110-2		1,10	1,40	2,70	3,47							
M250-50A	E105-2		1,05	1,35	2,50	3,21							
M230-50A	E100-3		1,00	1,30	2,30	2,95							

Fonte: Adaptado de APERAM (2025).

Contudo, a adição de silício surte efeito nas perdas elétricas do aço até certo ponto, como pode ser observado no gráfico proposto por Hou (1996), apresentado na Figura 3.1.6.

Figura 3.1.6 – Efeito do teor de silício nas perdas elétricas totais para aços submetidos a induções da 1,0 e 1,5T.



Fonte: Hou (1996).

Portanto, levando em consideração tal saturação nas perdas elétricas após determinado teor de silício, conclui-se que o mesmo há de ser dosado, uma vez que haveria desperdício de material após o ponto de saturação. Tal restrição é reforçada quando se analisa os impactos do silício na indução magnética do aço. De acordo com Landgraf (1998) há uma redução de 0,05T/%Si na indução magnética (σ) máxima do aço elétrico, e isso se deve ao fato do silício ser um elemento não magnético e substituir átomos de ferro na microestrutura do aço, o que diminui o magnetismo total do material. Outro motivo para não se utilizar valores altos de silício nas ligas de aço é que o mesmo torna o material frágil quando presente em teores acima de 3,5% (SOUZA, 2006), o que faria com que o aço não fosse robusto o suficiente para suportar o esforço mecânico exigido de um rotor de um motor por exemplo.

As perdas anômalas (Pa) ou excedentes (Pe) se relacionam com a microestrutura do aço elétrico: a movimentação das paredes dos domínios magnéticos entre os ciclos de magnetização faz com que microcorrentes parasitas sejam geradas em torno das paredes, resultando em perdas energéticas (ALMEIDA, 2013). Tal fenômeno ainda é objeto de estudo, uma vez que as formulações sobre tal perda não estão completamente consolidadas, o que se sabe é que quando

se subtrai a parcela de perdas por histerese e parasitas das perdas totais, sobra uma certa quantidade de energia dissipada, tal quantia é chamada de perdas anômalas ou excedentes (ANJOS, 2010).

Empiricamente, observa-se que perdas anômalas são favorecidas com o aumento do tamanho de grão (LANDGRAF, 1998; BERTOTTI *et al*, 1985), diferente do que ocorre com perdas por histerese, por isso busca-se encontrar um tamanho de grão ótimo no qual as perdas por histerese e anômalas sejam ótimas.

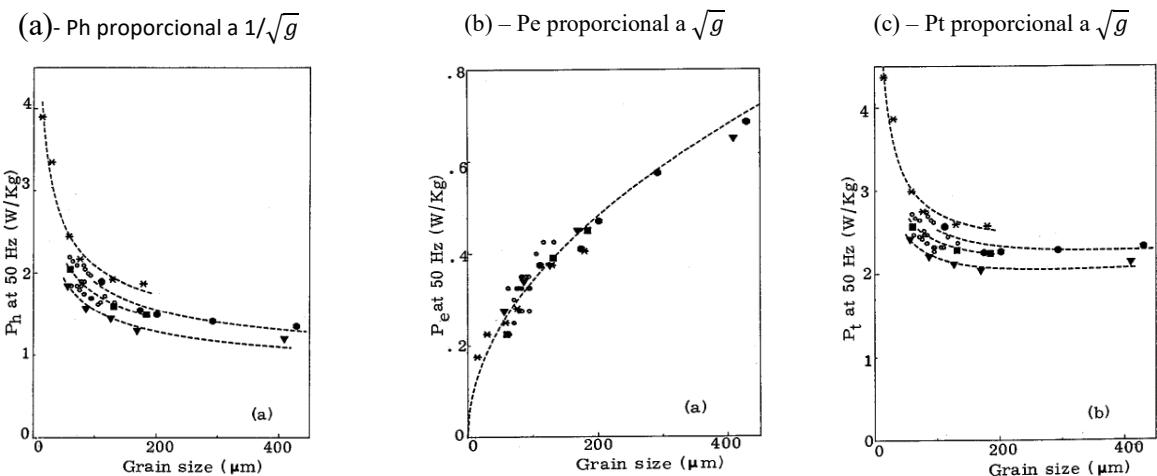
A fim de se otimizar o tamanho de grão, Bertotti e colaboradores (1985) encontraram equações empíricas que relacionam a quantidade das perdas com o tamanho do grão para quatro tipos de amostras de aço de grão não orientado contendo 3% Si e 0,4% Al. As Equações 3.1-4 e 3.1-5 são o fruto do ajuste das curvas aos pontos experimentais mostrados na Figura 3.1.7.

$$P_h = P_0 + \frac{A}{\sqrt{g}} \quad [W/m^3] \quad (3.1-4)$$

$$P_h = B\sqrt{g} \quad [W/m^3] \quad (3.1-5)$$

onde g é o tamanho de grão médio, P_0 a parcela de perda relacionada ao ancoramento dos domínios magnéticos pelos precipitados, A uma constante relacionada com a textura cristalográfica do material e B uma constante encontrada ao se adequar os dados à curva.

Figura 3.1.7- Perdas por histerese (P_h), excedente (P_e) e total (P_t) em função do tamanho de grão (g) para 4 tipos de amostras de aço baixo carbono 3%Si.



Fonte: Bertotti *et al.*, 1985.

Portanto, se faz necessário rigoroso controle do elemento alumínio afim de se controlar o tamanho do grão e otimizar a parcela anômala de perda.

Finalmente, há de se atentar ao fenômeno de formação de precipitados durante os processos de formação do aço: o carbono, se presente em excesso, pode se ligar a alguns elementos residuais, como o titânio por exemplo, e formar carbonetos. Seguindo essa mesma lógica, alguns elementos residuais oriundos de matérias primas ou de processos siderúrgicos, tais como nitrogênio, enxofre e oxigênio podem formar nitretos, sulfetos e óxidos (ANJOS, 2010). Tais compostos são capazes de ancorar nas paredes dos domínios magnéticos e influenciar as propriedades magnéticas do material, ou até mesmo influenciar o crescimento de grãos durante o processo de fabricação do aço, o que impacta nas propriedades magnéticas também. Por isso, há de se controlar a formação de precipitados, ou inclusões, o que pode ser feito através do controle de contaminações presentes em matérias primas.

3.2 Visão geral sobre ferroligas

Segundo Gasik (2013), ferroligas são ligas de ferro com uma porção significativa de outros elementos como silício, manganês, cromo, alumínio ou titânio. Tais ligas metálicas são utilizadas para adicionar elementos químicos dentro de banhos metálicos, cruciais no desenvolvimento das propriedades desejadas no material final.

Existem alguns motivos para se utilizar uma ferroliga de determinado elemento ao invés dele puro: o elemento pode ser de difícil obtenção em sua forma pura, o que faz com que não faça sentido purificá-lo se o objetivo final é utilizar o mesmo em uma liga de ferro, por exemplo o aço. O elemento puro pode não ser estável nas temperaturas de fabricação do aço, podendo apresentar afinidade com oxigênio ou nitrogênio, o que faz com que o mesmo seja consumido antes de agir na liga metálica. Finalmente, o custo de uma ferroliga de determinado elemento é muito menor do que o custo de uma liga do elemento puro. No mercado chinês, por exemplo, o preço da tonelada de FeSi75 (liga com 75% de silício e 25% de ferro) equivalia, em abril de 2025, em média a 57% do preço do silício metálico, de acordo com os gráficos de acompanhamento de preços disponibilizados pela Mysteel, uma das principais plataformas de inteligência de mercado da China voltada ao monitoramento de preços e tendências na indústria de metais, incluindo siderurgia, ferroligas e insumos industriais. As Figuras 3.2.1 e 3.2.2, retiradas do site (MYSTEEL, 2025), mostram tal diferença para o preço de tais materiais em diferentes regiões da China.

Figura 3.2.1- Valor médio da tonelada de FeSi 75 em diferentes regiões da China (Yuan[¥]/t).

Produto	Tipo de preço	Mercado	Especificação	Último registrado
FeSi	Peço de mercado	Shaanxi	75%FeSi	6,100
FeSi	Peço de mercado	Tianjin	75%FeSi	6,300
FeSi	Peço de mercado	Gansu	75%FeSi	6,200
FeSi	Peço de mercado	Henan	75%FeSi	6,400
FeSi	Peço de mercado	Interior da mongólia	75%FeSi	6,200

Fonte: MYSTEEL, 2025.

Figura 3.2.2- Valor médio da tonelada de Si Metal em diferentes regiões da China (Yuan[¥]/t).

Produto	Tipo de preço	Mercado	Especificação	Último registrado
Silicon Metal	Peço de mercado	Guangdong	3303# oxygen	11,550
Silicon Metal	Peço de mercado	Guangdong	421# oxygen	11,300
Silicon Metal	Peço de mercado	Tianjin	421# oxygen	10,750
Silicon Metal	Peço de mercado	Xinjiang	421# oxygen	10,400
Silicon Metal	Peço de mercado	Guangdong	441# oxygen	10,450

Fonte: MYSTEEL, 2025.

Os setores da metalurgia que mais utilizam ferroligas são a indústria do aço e a indústria de fundição, que juntas consomem cerca de 85 a 90% de toda ferroliga produzida no mundo (GASIK, 2013).

A liga de ferrosilício é utilizada amplamente no processo de desoxidação durante a produção de aços, tal processo é crucial no controle da qualidade metalúrgica do produto final (ABM PROCEEDINGS, 2013), e consiste na adição de elementos com alta afinidade pelo oxigênio, como o silício, o alumínio ou o manganês, com o objetivo de promover reações químicas que convertam o oxigênio dissolvido no metal líquido em óxidos estáveis e termodinamicamente favorecidos. Esses compostos são pouco solúveis na matriz metálica, tendem a se coalescer e a subir até a superfície do banho, onde são incorporados à escória e posteriormente removidos. Parte desses óxidos pode permanecer como inclusões não metálicas no aço solidificado, afetando diretamente suas propriedades metalúrgicas (ELKA MEHR, 2023), por exemplo nas propriedades magnéticas do aço, como visto anteriormente.

A liga de ferrosilício é amplamente utilizada pois se mostra 15% mais barata para a realização de tal processo quando comparada com outros materiais capazes de promover desoxidação, como o alumínio ou o manganês (PENG *et al*, 2024).

Quando se trata de utilização de ferrosilício em aços elétricos, há a necessidade de controle de alguns elementos na composição da ferroliga, uma vez que os mesmos podem afetar as propriedades elétricas do aço final, como visto anteriormente.

3.2.1 Produção de ferrosilício

O ferrosilício é produzido por meio da redução carbotérmica de materiais ricos em sílica (SiO_2) e óxidos de ferro (FeO , Fe_2O_3), utilizando carbono como agente redutor. As principais matérias primas incluem quartzo ou quartzito como fontes de silício, minério de ferro, carepa de laminação (*mill scale*) ou sucata de aço como fontes de ferro, e coque, carvão vegetal ou mineral como fontes de carbono (XLS METALS, 2023; GASIK, 2013). Tais matérias primas são alimentadas a um forno a arco elétrico que fornece energia suficiente para que as reações de redução ocorram e o ferrosilício seja fabricado.

O forno a arco elétrico é utilizado na fabricação de uma diversa gama de ferroligas, uma vez que o mesmo é capaz de atingir altas temperaturas com baixo potencial de oxigênio, condições essenciais para que as equações de redução ocorram com alta conversão de matéria prima. A construção do mesmo consiste em um cadinho com a parte interna revestida de

material refratário com eletrodos arranjados ao longo da região interna, como pode ser observado na Figura 3.2.3.

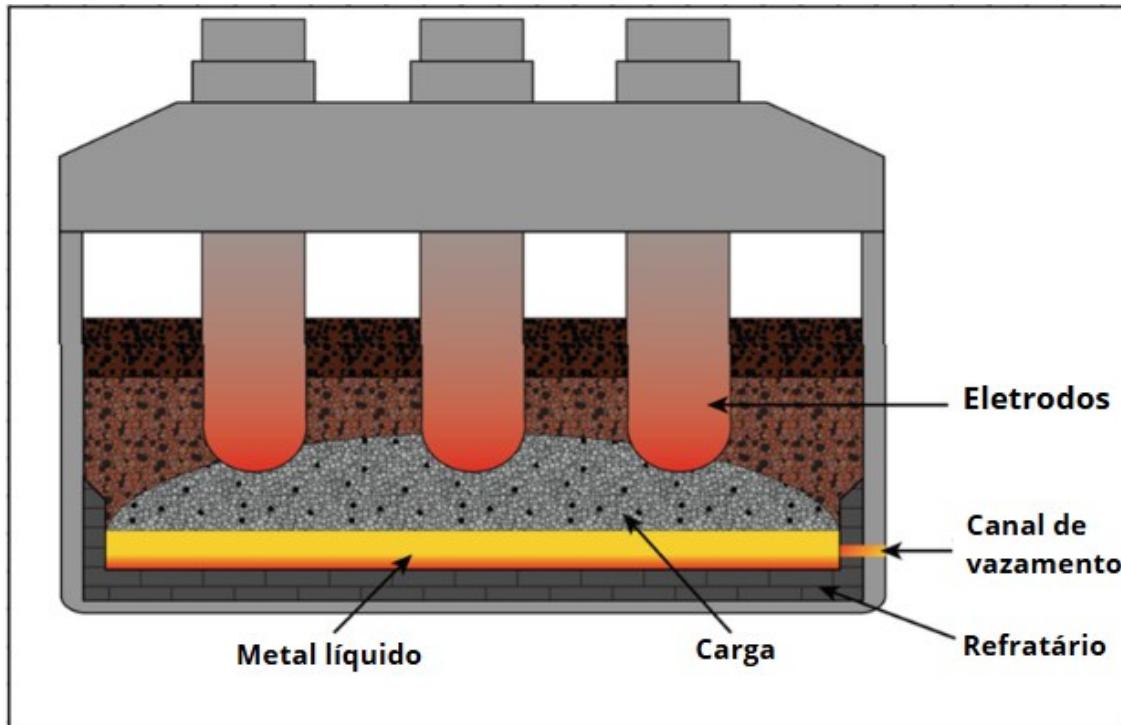
Figura 3.2.3- Forno circular com três eletrodos arranjados de forma triangular.



Fonte: GASIK, 2013.

Durante a operação do forno, todo o cadinho é preenchido com matéria prima e o eletrodo energizado com altas correntes, fazendo com que surja um arco elétrico em sua ponta devido à grande diferença de potencial entre a carga e o eletrodo. Assim, gera-se uma região de baixo potencial de oxigênio e altas temperaturas ao redor do eletrodo, condições ideais para que as reações de redução ocorram. Para que tais condições sejam atingidas, uma grande quantidade de energia é consumida, gasta-se cerca de 7000 a 8000 kWh/t na produção de FeSi-75 (75% Si) (GASIK, 2013). A Figura 3.2.4 apresenta um esquema do forno durante a operação.

Figura 3.2.4 - Esquema de um forno a arco elétrico para produção de ferroligas.



Fonte: BUBLIK *et al.*, 2021.

As Figuras 3.2.3 e 3.2.4 apresentam uma das configurações mais comuns de forno para produção da maior parte das ferroligas incluindo a liga de ferrosilício (FeSi): forno circular com três eletrodos dispostos de maneira triangular operando com corrente alternada (AC). Contudo, há diversas variações nos parâmetros de construção que resultam em diferentes configurações de forno que podem ser encontradas, como apresentado na Tabela 3.2-1.

Tabela 3.2-1 - Diferentes parâmetros para um forno a arco elétrico.

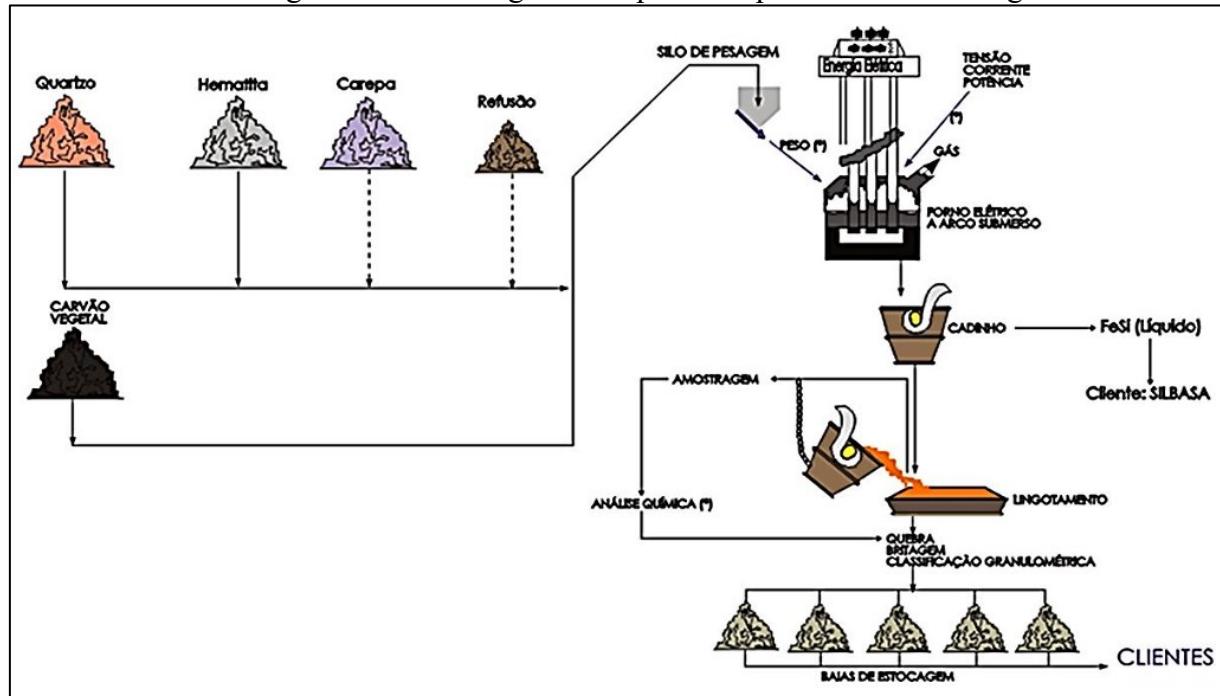
<i>Parâmetro</i>	<i>Diferentes configurações encontradas</i>
Forma do cadiño	Circular ou retangular
Fonte de energia	AC ou DC
Tipo de arco	Aberto, submerso, blindado, escovado, resistência (sem arco)
Número de eletrodos (fornos AC)	Monofásicos: 2 Trifásicos: 3, 6 (três pares) ou 6 (2x3)
Número de cátodos (fornos DC)	1, 2

Teto	Fechado, semifechado, aberto
Resfriamento lateral	Convecção natural, convecção forçada, resfriamento por filme de água, resfriamento por aspersão de água, componentes de cobre com resfriamento por água.

Fonte: GASIK, 2013.

O ferrosilício produzido no forno é retirado do mesmo através do canal de vazamento do equipamento de forma que o metal líquido é disposto em um cadrinho revestido com material refratário, conhecido como panela, tal etapa é conhecida como vazamento do forno. Posteriormente, o metal da panela é vertido em um molde metálico conhecido como lingoteira, tal etapa consiste no processo de lingotamento. Assim, ocorre o resfriamento e consequente solidificação do metal líquido, formando o chamado lingote. Uma vez devidamente resfriado, o lingote é submetido ao processo de britagem, que faz com que o ferrosilício chegue ao cliente na granulometria exigida pelo mesmo para atender suas necessidades. A Figura 3.2.5 apresenta um fluxograma que mostra o processo completo de obtenção de ferrosilício.

Figura 3.2.5- Fluxograma do processo produtivo de ferroligas.



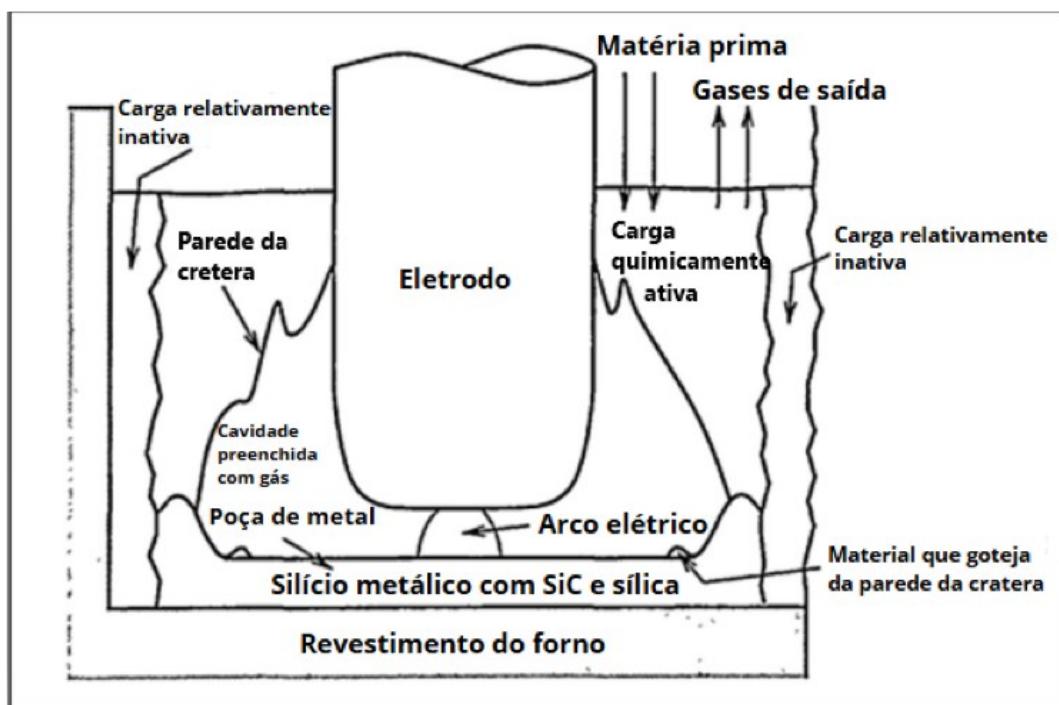
Fonte: UFOP (2020).

3.2.2 Zonas de reação que ocorrem no forno

A fim de entender o mecanismo reacional que ocorre no interior do forno, primeiro é necessário compreender as condições físico-químicas ao redor do eletrodo, uma vez que as reações ocorrem nessa região. Algumas observações feitas em fornos em escala de bancada, bem como escavações feitas em fornos industriais que pararam de operar, como apresentado no trabalho realizado por Tranell e colaboradores (2010), mostraram que devido ao arco elétrico presente na ponta dos eletrodos há o surgimento de uma cavidade preenchida de gases nessa região, como pode ser observado na Figura 3.2.6.

Ao longo da cavidade há uma distribuição de temperaturas, formando uma zona de alta temperatura próxima ao arco elétrico e na parte inferior da parede da cavidade, zona interna (LÚCIO *et al.*, 1980), que atinge temperaturas superiores a 1800 °C. À medida que se avança para partes superiores da parede da cavidade, as temperaturas atingem no máximo 1600 °C (TRANELL *et al.*, 2010; ANDERSEN, 1995) de forma que tal região foi denominada como zona externa por Lúcio e colaboradores (1980).

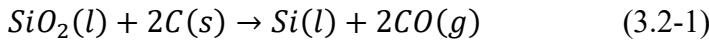
Figura 3.2.6 - Esquema da situação da região ao redor de um eletrodo.



Fonte: ANDERSEN, 1995.

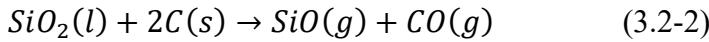
3.2.3 Redução da sílica

A principal reação envolvida durante a produção de ferrosilício é a de redução da sílica (SiO_2) a silício metálico, apresentada na Equação 3.2-1.

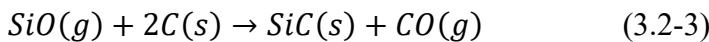


Contudo, a obtenção de silício metálico a partir da reação entre carbono sólido e sílica líquida, como sugere a Equação 3.2-1, seria muito lenta, não correspondendo aos resultados obtidos na prática durante a operação dos fornos. Por isso, sugere-se que o produto real entre SiO_2 e C é o gás SiO , que é obtido na cavidade do forno sob altas temperaturas (LÚCIO *et al.*, 1980). Posteriormente, tal gás passa por uma série de reações que resultam no silício líquido.

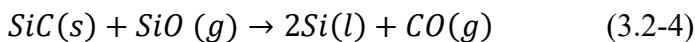
A fim de realizar uma simulação computacional do processo reacional que ocorre dentro do forno, Andersen (1995) aborda os possíveis mecanismos reacionais que ocorrem durante a redução da sílica. Segundo o autor, a maior parte da energia disponível na zona interna é utilizada na reação de redução de sílica para óxido de silício, Equação 3.2-2, representando um consumo de cerca de 93% de toda energia empregada no forno. Assim, pode-se concluir que a cavidade é composta pelos gases SiO e CO .



O SiO gasoso permeia da zona interna para zona externa, de forma que em temperaturas próximas a 1514 °C forma-se carbeto de silício sólido (SiC), a partir da reação apresentada na Equação 3.2-3. Assim, a parede da cratera é rica nesse composto.



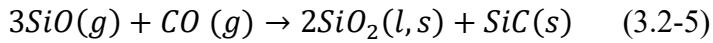
Temperaturas acima de 1811 °C possibilitam a ocorrência da reação expressa na Equação 3.2-4, que explica como se dá a formação de silício metálico na zona interna do forno e fecha o mecanismo para a produção de silício nessa região.



A parcela de SiO que permeia até as regiões superiores da cavidade possui três opções reacionais, sendo uma delas uma outra possibilidade de formação de silício metálico:

- 1 Formar SiC de acordo com a Equação 3.2-3.

- 2 Formar SiC e SiO₂ a partir de uma reação com CO (g) de acordo com a Equação 3.2-5 (segunda reação mais favorável sob um ponto de vista termodinâmico).

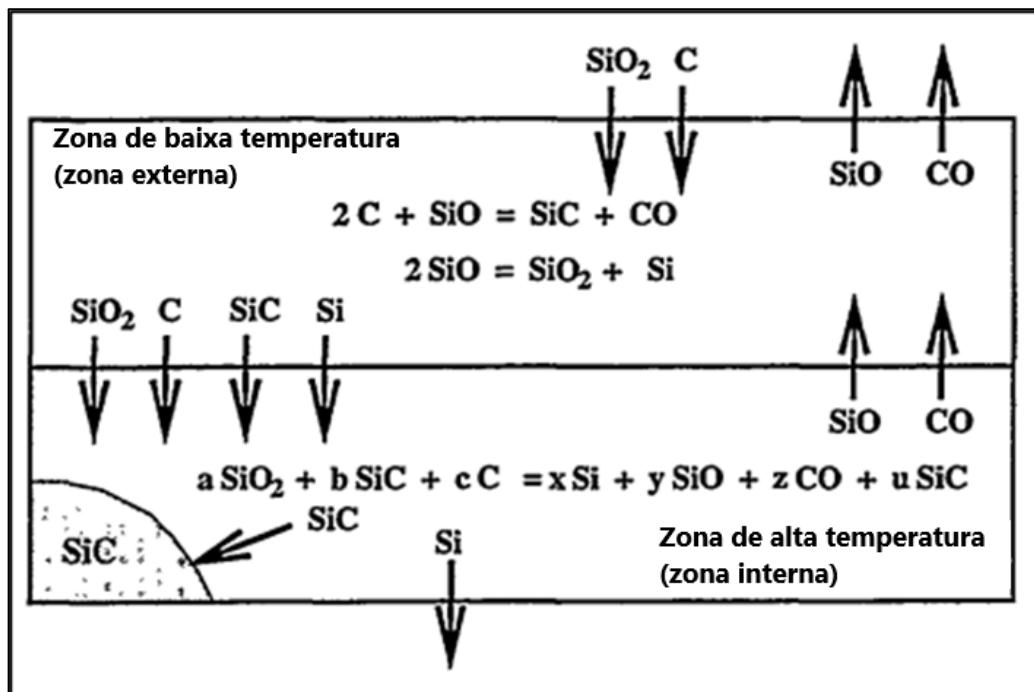


- 3 Condensar ao entrar em contato com a superfície da parede e formar SiO₂ e Si de acordo com a reação 3.2-6 (condição pouco favorável termodinamicamente).



A Figura 3.2.7 apresenta um esquema que resume o que foi discutido sobre as regiões do forno e as reações que ocorrem. Nota-se que as reações que ocorrem na zona interna, Equações 3.2-2 a 3.2-4, foram somadas e reduzidas a uma única equação global para representar o mecanismo reacional.

Figura 3.2.7 - Reações que ocorrem em cada zona da cavidade do eletrodo.



Fonte: HALVORSEN, 1995.

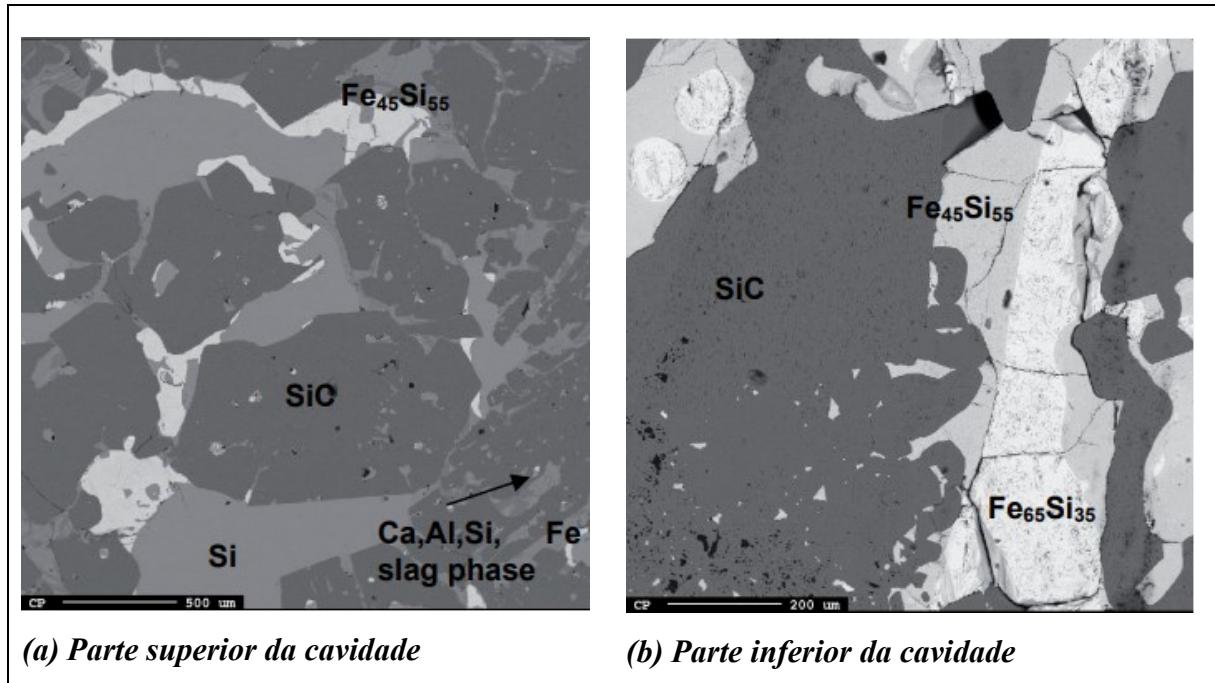
Tranell *et al.* (2010) coletaram material de um forno industrial de FeSi75 por meio de sua escavação após uma parada programada na planta da Finnfjord, na Noruega. A análise da composição química de materiais coletados em diferentes pontos do forno permitiu uma verificação acerca das reações propostas baseadas na teoria termodinâmica, como feito por Andersen (1995) no trabalho exposto anteriormente. Durante a condução do experimento, os autores constataram que as paredes da cratera eram compostas majoritariamente de SiC, Si e Fe_xSi_y, como pode ser constatado na Figura 3.2.8, retiradas do artigo, que mostra o resultado

de uma análise química via EPMA de amostras retiradas das partes superiores e inferiores da parede da cavidade.

A grande presença de FeSi na parte inferior da parede da cavidade mostra como de fato a reação de redução entre SiO e SiC (Equação 3.2-4) ocorre com mais frequência nessa zona interna de maior temperatura, como proposto por Andersen (1995), ao passo que o SiC predomina frente aos metais (Si e FeSi) na parte superior da parede da cratera, devido às condições menos favoráveis para que a reação ocorra. A ausência de SiO₂ e a presença de Si na parte superior da cratera reforçam as condições desfavoráveis para que a formação de Si nessa região seja via Equação 3.2-6. Tranell *et al.* (2010) sugerem que em alguns pontos dessa região a temperatura é alta o suficiente para que ocorra a reação via Equação 3.2-4.

Outro aspecto observado foi a intensa presença de canais profundos de passagem de gás nas regiões fora da cavidade, o que reforça a intensa formação e transporte de SiO e CO em todo o forno.

Figura 3.2.8 - Análise EPMA de amostras de eferentes regiões da parede da cavidade do eletrodo: parte superior (a) e parte inferior (b).



Fonte: TRANELL *et al.* (2010).

3.2.4 Redução de óxidos ferrosos

Quanto a redução dos óxidos de ferro, Tranell *et al.* (2010) definem que a redução do mesmo ocorre ainda nas zonas mais altas do forno através da reação entre os óxidos ferrosos (FeO ou Fe₂O₃) e CO (Equação 3.2-7).



Assim formam-se gotículas de ferro saturadas com carbono, que são capazes de dissolver o silício. Lúcio *et al.* (1980) definem que tal dissolução é exotérmica, liberando mais calor na medida em que se aumenta a quantidade de ferro na liga, como pode ser observado na Tabela 3.2-2.

Tabela 3.2-2 – Entalpia de formação para algumas ligas líquidas – FeSi a 1600 °C.

%Si	N _{Si}	ΔH(cal/mol)
15	0,26	-7359,8
45	0,62	-6892,4
75	0,86	-3529
85	0,92	-1975
90	0,95	-1279

Fonte: LÚCIO *et al.* (1980).

Devido tal efeito, a atividade do silício cai e torna possível que as reações de formação do mesmo ocorram a temperaturas menores. Lúcio *et al.* (1980) trazem um exemplo hipotético sobre tal efeito, em que a Equação 3.2-8 apresenta a formação de silício puro (sem o ferro), a Equação 3.2-9 diz respeito à absorção de silício pelo ferro, formando uma liga com 45% de silício (Si), e a soma das duas equações resulta numa equação global de formação de FeSi45, Equação 3.2-10. A Tabela 3.2-3 mostra as reações, suas respectivas energias livre de Gibbs e a temperatura a partir da qual as equações de formação de silício metálico (3.2-7 e 3.2-8) passam a ser espontâneas ($ΔG^{\circ} < 0$).

Tabela 3.2-3 – Efeito da presença de ferro na formação de silício metálico.

Equação	Reação	Equação de $ΔG^{\circ}$ [J/mol]	T [°C]
(3.2-8)	$2SiC(s) + SiO_2(l) \rightarrow 3Si(l) + 2CO$	$198560 - 94,92T$	1817,85
(3.2-9)	$3 Si(l) \rightarrow 3\underline{Si}(l)$	$-8646 - 0,33T$	-
(3.2-10)	$2SiC(s) + SiO_2(l) \rightarrow 3\underline{Si}(l) + 2CO$	$189914 - 95,25T$	1720,85

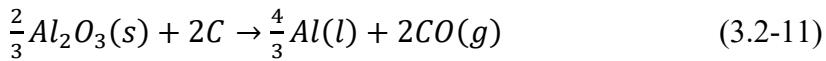
Fonte: LÚCIO *et al.* (1980).

Nota-se que a temperatura de início de reação diminui cerca de 100 °C devido a presença de ferro na liga, o que enfatiza ainda mais os motivos do ferrosilício ser mais barato que o silício metálico.

3.2.5 Redução de outros elementos

Na composição química das matérias primas que alimentam o forno, há a presença, em pequenas concentrações, de outros elementos metálicos diferentes daqueles que se esperava para tal matéria prima, sendo os mesmos presentes tanto em sua forma pura ou como óxidos (GASIK, 2013).

Segundo Tuset (1992), as impurezas mais comumente encontradas nas matérias primas são óxidos de alumínio e cálcio, presentes majoritariamente na composição das matérias primas redutoras utilizadas (carvão mineral ou vegetal e coque). Assim, tais elementos são facilmente reduzidos no forno devido ao efeito de dissolução dos mesmos pelo silício, similar ao que ocorre entre ferro e silício, o que favorece a ocorrência das reações 3.2-11 e 3.2-12 (LÚCIO *et al.*, 1980).



Por isso, há a presença de tais metais no material final, o que representa um problema quando se trata de ferrosilício de alta pureza.

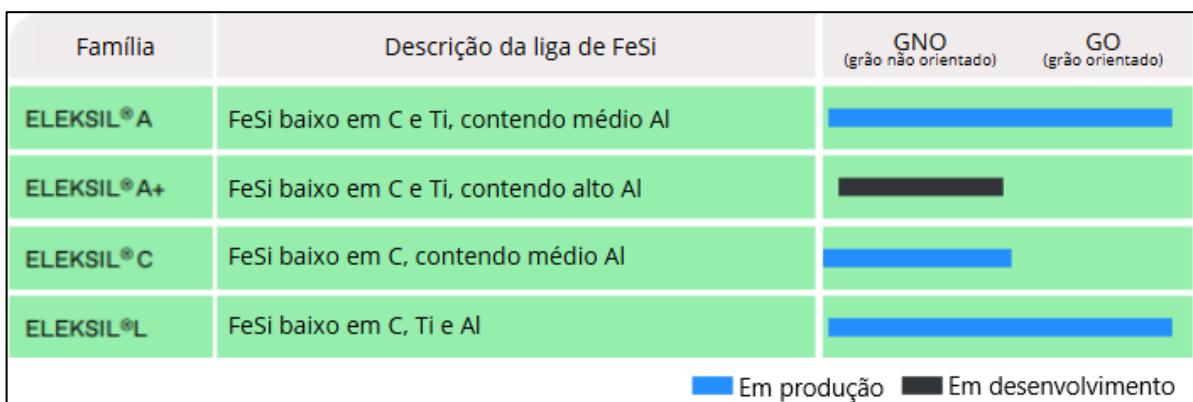
3.3 Refino de ferrosilício

As aplicações de ferrosilício na produção de aço elétrico exigem alto controle de elementos, como visto anteriormente, a presença de alumínio em abundância no material, por exemplo, comprometeria as propriedades magnéticas do aço. Por isso, as produtoras de ferrosilício produzem um material de elevada pureza, com controle rigoroso de microcontaminantes e alto teor de silício, em média 75%, tal produto é conhecido como ferrosilício 75 *high purity* (FeSi75-HP). Para obtê-lo, é necessário a adição de uma etapa entre o vazamento e o lingotamento do forno: o refino, que consiste na oxidação e consequente remoção de alguns metais indesejados (microcontaminantes) do banho metálico, principalmente Al e Ca que são os mais abundantes como visto anteriormente.

A Figura 3.3.1 apresenta a relação entre o tipo de aço elétrico e o tipo de ferrosilício de alta pureza utilizado em sua produção, sendo o ferrosilício em questão produtos da linha ELKSIL® da empresa Elkem. A fim de se comparar as propriedades químicas de diferentes produtoras de ferrosilício, coletou-se dados da composição química típica dos FeSi75-HP da empresa norueguesa Elkem e da brasileira MINASLIGAS, apresentados na Tabela 3.3-1. Nota-se como o controle dos elementos alumínio, carbono e titânio é algo comum no material final de alta pureza de ambas as companhias, além do fato de que a produção de aços elétricos do tipo grão orientado (GO) exige baixo titânio e alumínio ao avaliar pela linha ELKSIL® utilizada.

Para efeito de comparação e compreensão do grau de remoção necessário para se obter o FeSi75-HP, apresentou-se também na Tabela 3.3-1 as especificações químicas de um ferrosilício que não passa pelo processo de refino, conhecido como *standard* (STD), tal produto é comercializado pela empresa brasileira FERBASA. Comparando-se os FeSi75-HP com o FeSi75-STD, nota-se que o STD possui até 35 vezes mais alumínio que um ferrosilício refinado e até 13 vezes mais carbono, o que torna inviável a aplicação do mesmo em aços elétricos.

Figura 3.3.1- Tipo de aço elétrico e o tipo de ferrosilício ELKSIL® utilizado.



Fonte: ELKEM, 2025.

Tabela 3.3-1 - Composições químicas típicas de ferrosilício de diferentes empresas.

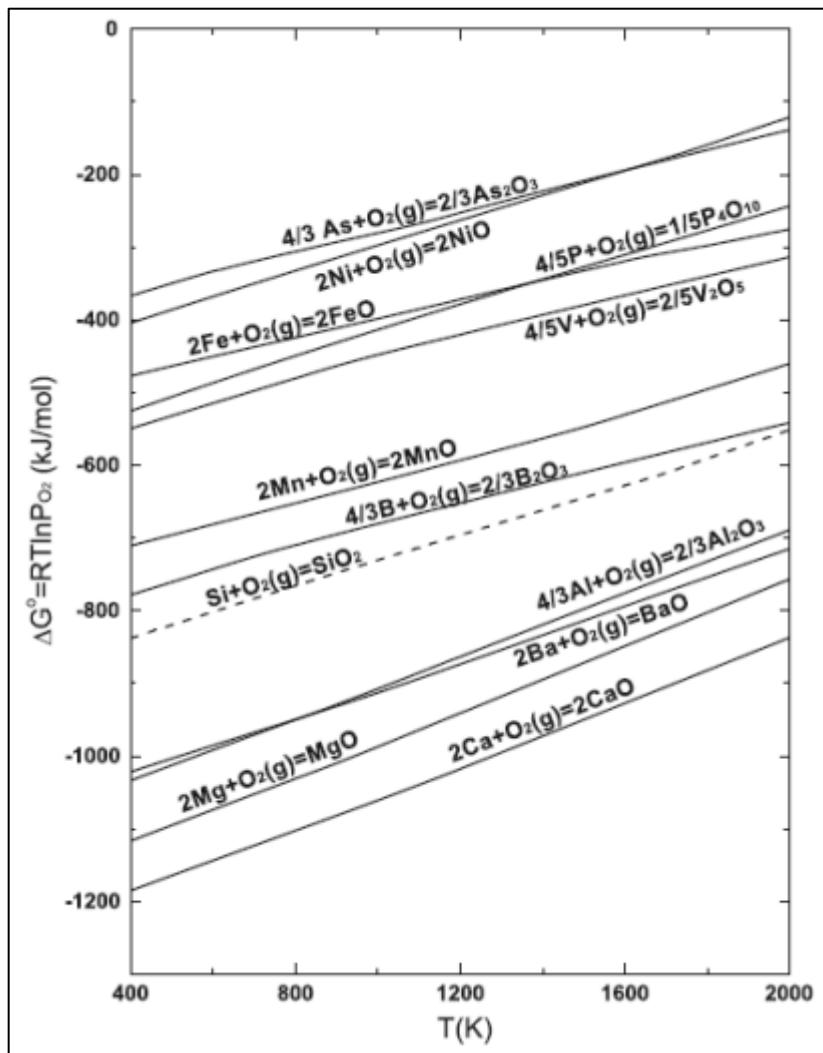
	EMPRESA FORNECEDORA							
	MINASLIGAS			ELKEM				FERBASA
Elemento (% máx)	Baixo Al	Alta pureza	Ultra baixo Al	ELKSIL® SÉRIE-A	ELKSIL® SÉRIE-C	ELKSIL® SÉRIE-F	ELKSIL® SÉRIE-L	FeSi75 standard
%Si	75 – 78	75 – 78	75 – 78	75	75	75	75	75
%Al	0,1	0,04	0,02	0,5	1	0,1	0,05	0,7
%Ca	0,1	0,02	0,02	-	-	-	-	-
%C	0,07	0,03	0,02	0,015	0,02	0,02	0,015	0,2
%Ti	0,03	0,02	0,02	0,02	0,1	0,1	0,02	-
%P	0,01	0,02	0,02	-	-	-	-	0,04
%S	0,1	0,003	0,001	-	-	-	-	0,005
Referência	MINASLIGAS (2025)			ELKEM (2025)				FERBASA (2025)

Fonte: Compilado do autor, 2025.

3.3.1 Remoção de cálcio e alumínio do banho metálico

A remoção de Ca e Al do banho metálico se dá através da oxidação dos mesmos, processo que é termodinamicamente possível pelo fato de tais elementos apresentarem maior afinidade ao oxigênio quando comparados ao silício, como é possível observar pelo diagrama de Ellingham apresentado na Figura 3.3.2.

Figura 3.3.2 – Diagrama de Ellingham.



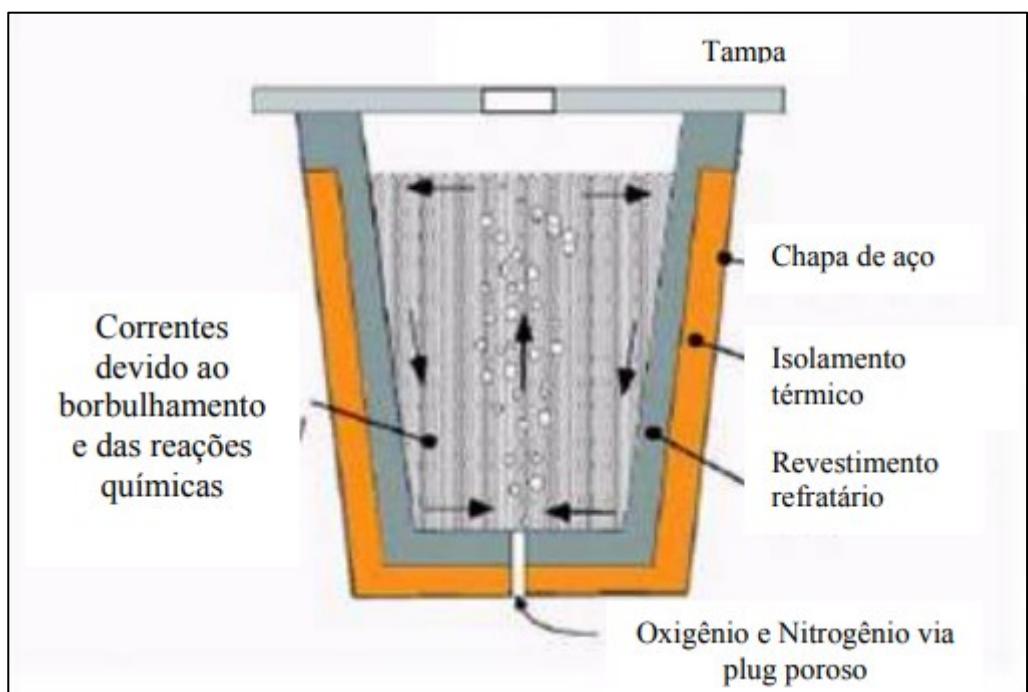
Fonte: HOSSEINPOUR, 2018.

Assim, as técnicas de refino consistem na adição de oxigênio ou agentes oxidantes no banho metálico afim de oxidar o Ca e Al presentes no mesmo, processo que ocasiona a formação de uma nova fase na superfície da panela, composta pelos óxidos gerados no refino (HOSSEINPOUR, 2018). Contudo, parte do silício presente no banho metálico também é oxidado, o que resulta na formação de uma fase composta majoritariamente por SiO₂, Al₂O₃ e CaO na superfície do banho metálico, conhecida como escória, que é retirada antes do lingotamento do material, fazendo com que o ferrosilício resultante reduza em seus teores de Ca e Al (TUSSET, 1992).

Quanto a adição dos agentes oxidantes, um dos elementos mais utilizados é o oxigênio, o mesmo é injetado no banho metálico através de um fluxo de ar ou mistura gasosa (rica em O₂), o que é feito através de um plug instalado na parte inferior da panela refratária (Figura

3.3.3), ou de um tubo refratário, conhecido como lança, que penetra pela superfície da panela. Contudo, é possível a adição de alguns elementos agentes oxidantes diretamente no banho, Fe_2O_3 por exemplo (TUSSET, 1992; GASIK, 2013), ou até mesmo de elementos escorificantes, areia siliciosa rica em SiO_2 por exemplo, formando uma escória sintética que favorece a remoção dos elementos metálicos indesejados (Al e Ca). Geralmente, nos processos industriais combina-se a injeção de oxigênio com a adição de escória sintética (BORGES, 2006).

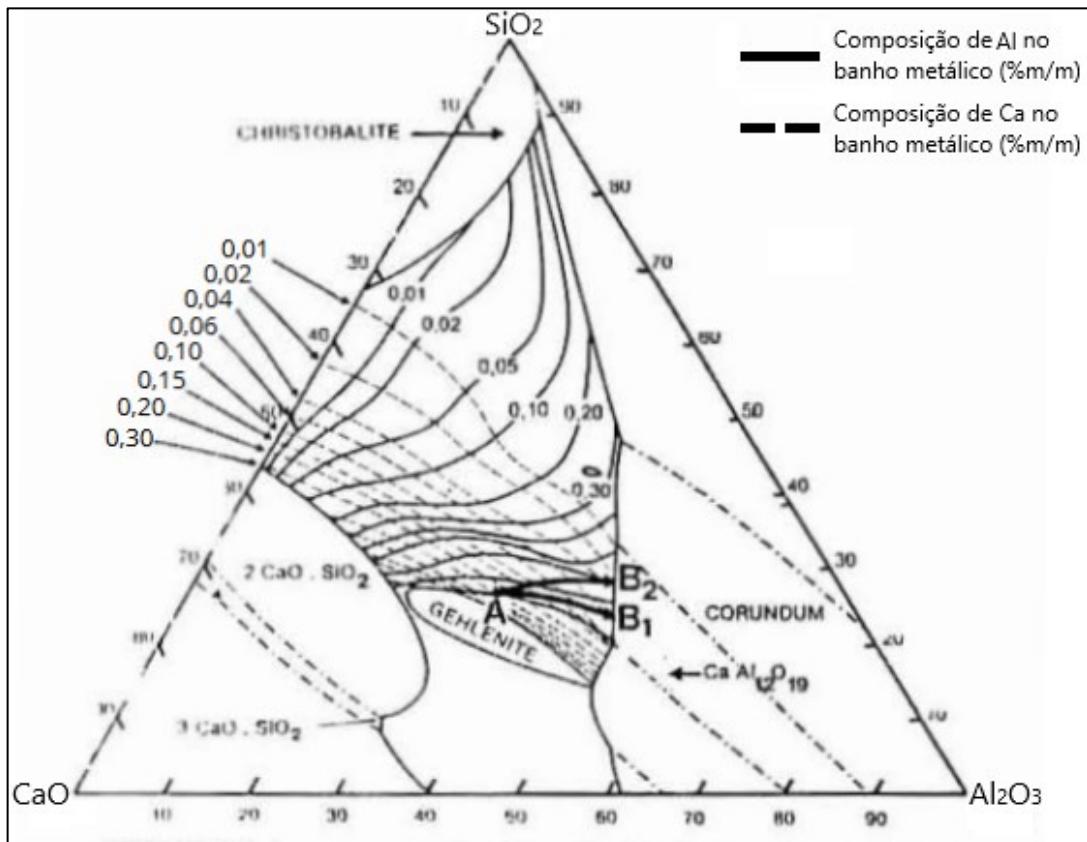
Figura 3.3.3 - Diagrama esquemático do refino com sopro pelo fundo da panela.



Fonte: BORGES *et al.*, 2006.

O controle da eficiência do refino é possível através da análise da composição da escória, para tal utiliza-se o diagrama de fases $SiO_2-Al_2O_3-CaO$. Nesse sentido, Schei *et al.* (1998) desenvolveram um diagrama ternário, apresentado na Figura 3.3.4, no qual é possível relacionar a quantidade de metal (Al e Ca) dissolvido no banho como impureza, e a composição química de óxidos que entram em equilíbrio com tal quantidade na temperatura de 1550 °C, temperatura adotada como padrão para o metal líquido na panela.

Figura 3.3.4 - Diagrama de equilíbrio entre metais dissolvidos e seus óxidos a 1550 °C.



Fonte: BORGES *et al.*, 2006.

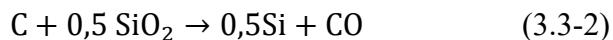
Vale destacar que o silício é reduzido junto com alumínio e cálcio ao longo do processo de redução, o que faz com que o banho metálico se torne menos rico em tal elemento, o que representa um problema, tendo em vista que o objetivo de todo o processo é produzir ligas ricas em silício. Afim de evitar tal situação, é possível utilizar materiais ricos em SiO_2 como escória sintética, areia siliciosa por exemplo, o que faz com que o equilíbrio de fases seja atingido e o silício do banho metálico seja poupadão.

3.3.2 Remoção de carbono do banho metálico

O carbono pode ser encontrado dissolvido no ferrosilício ou como partículas de SiC , sendo que apenas a forma dissolvida é passível de remoção, uma vez que a temperatura do metal após o vazamento, por volta de 1550 °C, não favorece que a reação de redução de SiC por SiO ocorra, uma vez que a mesma ocorre apenas em temperaturas superiores a 1811 °C. Assim, a solubilidade de carbono dissolvido no FeSi75 em equilíbrio com SiC é dada pela Equação 3.3-1 (KLEVAN, 1997).

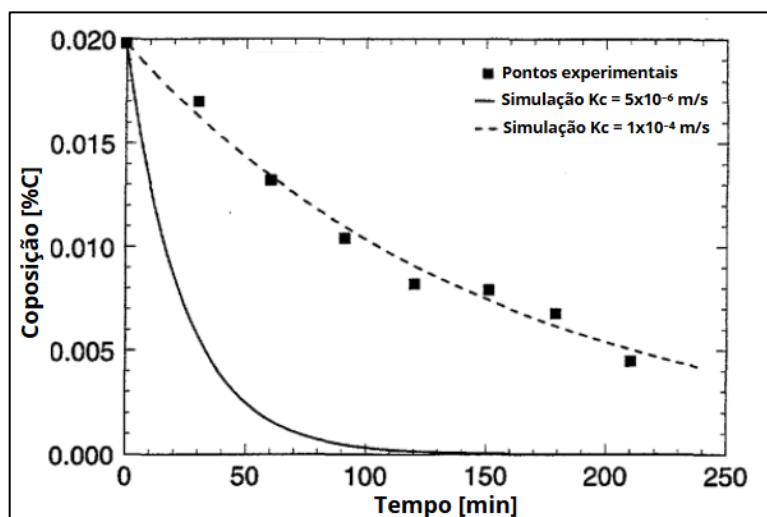
$$\log [\%C]_{FeSi} = 3,5 - \frac{10,003}{T} \quad (3.3-1)$$

Klevan (1997) estudou a remoção de carbono de banhos metálicos de FeSi e Si metálico, em que o método de aplicação industrial consiste de utilizar a injeção de uma mistura de gás inerte, argônio por exemplo, combinado com oxigênio (similar ao realizado na remoção de Al e Ca) para remover tal elemento. Nesse caso, o oxigênio presente formaria SiO₂, o que viabilizaria a ocorrência da reação entre a sílica e o carbono dissolvido, como indicado na Equação 3.3-2.



Assim, uma vez formado, há a adesão do CO às moléculas de gás presentes no banho, formando bolhas que saem pelo topo da panela. Contudo, ao se analisar o coeficiente de transferência de massa (K_c) para o transporte de CO do banho metálico à superfície da bolha, encontrou-se um valor muito baixo: 1×10^{-4} m/s, o que indica que a remoção do elemento por tal método seria muito demorada. Experimentalmente, constata-se tal característica inerente ao refino de carbono, a Figura 3.3.5 apresenta um gráfico com pontos experimentais coletados durante a descarbonização em bancada de um banho de silício metálico a 1600 °C, onde nota-se que demorou cerca de 100 minutos para que a concentração de carbono caísse pela metade. A Figura 3.3.5 também apresenta duas curvas: uma gerada pelo modelo proposto por Klevan (1997) considerando um K_c de 1×10^{-4} m/s, e outra gerada utilizando K_c de 5×10^{-6} , e dessa forma o autor conseguiu achar o valor adequado para a constante.

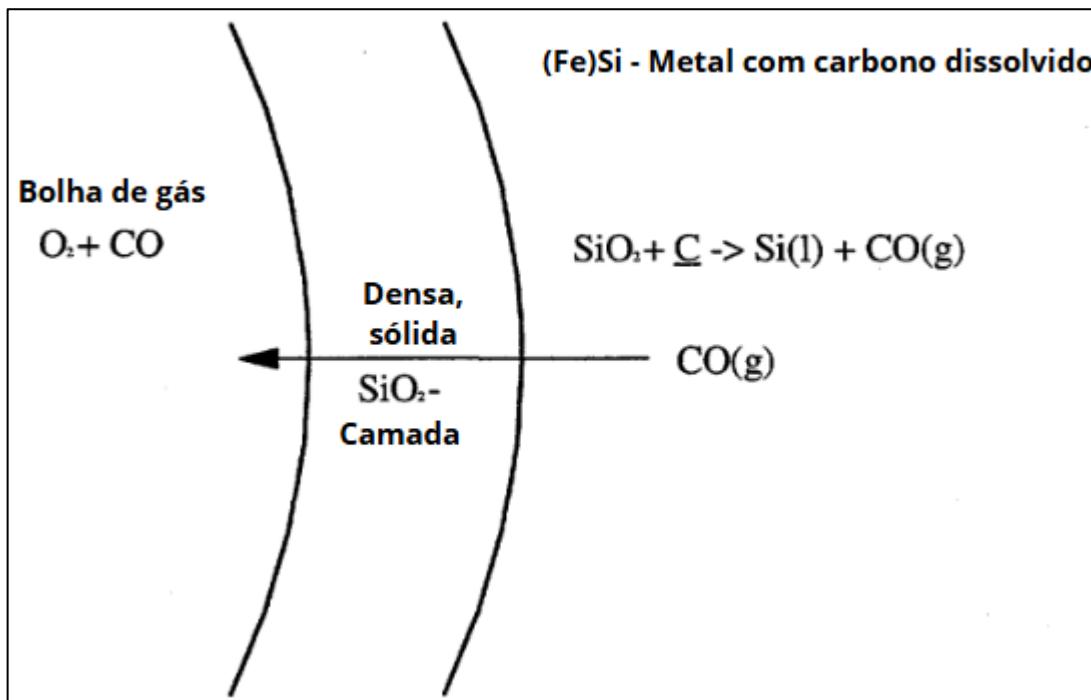
Figura 3.3.5 - Descarbonização de um banho metálico de Si a 1600 °C.



Fonte: KLEVAN (1997).

Ainda segundo Klevan (1997), a baixa magnitude do coeficiente se deve pela ocorrência de uma camada de SiO_2 na superfície das bolhas de oxigênio e CO, que dificultam a passagem de CO do seio da fase líquida para a fase gasosa. A Figura 3.3.6 apresenta um esquema que representa tal fenômeno.

Figura 3.3.6 - Esquematização dos fenômenos interfaciais que ocorrem na transferência de C.



Fonte: KLEVAN (1997).

Portanto, há de se avaliar a viabilidade econômica do processo quando se pensa em produzir produto de baixo carbono, uma vez que parte do metal tende a se solidificar na panela devido ao alto tempo de refino, o que gera perdas produtivas, além do fato de uma grande quantidade de oxigênio ser empregada para tal.

Assim, conclui-se que a injeção de um gás rico em oxigênio é o método mais comum de refino durante a produção do FeSi75-HP. Tal processo é efetivo na remoção de alumínio e carbono presentes no banho metálico. Contudo, o carbono demanda um tempo maior para ser removido de forma efetiva, devido a limitações durante a transferência de massa do mesmo.

4 CONCLUSÃO

De acordo com o que foi apresentado durante o desenvolvimento do trabalho, conclui-se que o mercado de componentes elétricos busca por aços que apresentem alta permeabilidade magnética e baixas perdas magnéticas, nesse âmbito a presença de três elementos na composição do aço elétrico deve ser controlada, sendo eles silício, alumínio e carbono.

O silício age como desoxidante durante a fabricação do aço, além disso é capaz de diminuir as perdas por correntes parasitas (Pp), o que otimiza as propriedades magnéticas do material. Contudo, se adicionado em teores acima de 3,5% em massa, pode comprometer as propriedades mecânicas do aço elétrico.

O alumínio, favorece a formação de uma microestrutura ferrítica (magnética) e age como controlador do crescimento de grãos durante a fabricação do aço. Tendo em vista que perdas magnéticas por histerese (Ph) são favorecidas por grãos maiores e perdas magnéticas anômalas (Pa) são favorecidas por grãos menores, há de se controlar rigorosamente o crescimento de grãos a fim de se encontrar um equilíbrio entre as duas perdas, por isso o alumínio deve ser dosado na microestrutura do aço elétrico.

O carbono é capaz de formar precipitados que ancoram nas paredes dos domínios magnéticos e influenciam as propriedades magnéticas do aço, por isso deve estar presente em baixas quantidades.

Por isso, as aciarias exigem das produtoras de ferrosilício um produto com baixos teores de carbono e alumínio, conhecido como ferrosilício de alta pureza, *high purity* (HP), que possui até 35 vezes menos alumínio e 13 vezes menos carbono do que um ferrosilício comum.

O ferrosilício é produzido em um forno a arco elétrico, que funciona como um reator que fornece a energia necessária para que a sílica (SiO_2) e os óxidos ferrosos (FeO e Fe_2O_3) reajam com o carbono e tornem-se metal. Utiliza-se quartzo ou quartzito como fontes de silício, minério de ferro, carepa de laminação (*mill scale*) ou sucata de aço como fontes de ferro, e coque ou carvão vegetal como fontes de carbono, contudo tais matérias primas carregam determinada quantidade de alumínio e cálcio que acabam no banho metálico final e devem ser removidas afim de se obter um produto mais puro. Quanto ao carbono, o mesmo é solubilizado pelo FeSi e por isso também se faz presente no material retirado do forno.

Por isso, é necessário o processo de refino metalúrgico, sendo que para aplicações industriais o processo consiste na adição de uma corrente de oxigênio na panela, que é capaz

de oxidar o alumínio e cálcio presente além de formar bolhas que removem o carbono do banho metálico. Contudo, há algumas limitações durante o processo de refino: o silício do banho metálico é oxidado junto com o alumínio e o cálcio, por isso, a fim minimizar as perdas de silício pode se adicionar areia siliciosa ao banho metálico. Outra limitação, é que o processo de remoção de carbono se mostra muito demorado, o que pode resultar perdas metálicas por solidificação do FeSi na panela.

Vale destacar que durante a condução do trabalho encontrou-se grandes dificuldades de utilizar referências bibliográficas atuais sobre ferroligas, além disso, notou-se uma grande concentração de trabalhos relevantes sobre o assunto na Noruega.

5 REFERÊNCIAS

- ABRAFE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Publicações**. São Paulo: ABRAFE, [s.d.]. Disponível em: <https://abrafe.ind.br/publicacoes/>. Acesso em: 24 mar. 2025.
- ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. Estudo da taxa de desoxidação em aços desoxidados ao silício e manganês. In: ABM Proceedings, 2013.
- APERAM S.A. Aços Elétricos. Cadernos Técnicos. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/produtos/biblioteca-tecnica/>. Acesso em: 24 Março 2025.
- ALMEIDA, A. A. Influência do tamanho de grão, teor de silício e frequência de excitação nas perdas anômalas do aço GNO. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- ANDERSEN, B. Process model for carbothermic production of silicon metal. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de Trondheim, Trondheim, 1995.
- ANJOS, M. S. Desenvolvimento e avaliação de aços para fins elétricos totalmente processados em recozimento em caixa. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- BERTOTTI, G; DI SCHINO, G; MILONE, A.F; FIORILLO, F. On the effect of grain size on magnetic losses of 3% non-oriented sife. *Journal de Physique*, v. 46, n. 9, p. 385–388, setembro 1985.
- BOHN, F. et al. Propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não- orientado. Anais do XVI CBECIMAT , Porto Alegre, 02 dez. 2004.
- CAMPOS, A. A. Desenvolvimento de escória sintética sinterizada para produção de aços elétricos de grão orientado (GO). Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- BORGES, C. C; VILABOIM, L.F.B; SILVA, P.A; VIEIRA, R.A. Tecnologia de produção de ligas de alto silício e suas aplicações na produção de ferro e aço. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL, 37., 2006, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ABM, 2006.
- BUBLIK, Sergey; OLSEN, Jan; LOOMBA, Varun; REYNOLDS, Quinn; EINARSrud, Kristian. A review of ferroalloy tapping models. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 52, p. 1–10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02134-5>.
- CAMPOS, A. A. *Desenvolvimento de escória sintética sinterizada para produção de aços elétricos de grão orientado (GO)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. P. 419 – 437, 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.

- CULLITY, B. D; GRAHAM, C. D. – *Introduction to Magnetic Materials* (2^a ed., 2008).
- CUNHA, M.A; PAOLINELLI, S.C; CESAR, M.G.M.M. "Avanços Na Produção De Aço Silício De Grão Não Orientado Na Acesita" In. 56º Congresso Anual Da ABM (2001)
- ELKA MEHR INDUSTRIES. *Steel deoxidation: a comprehensive analysis*. Disponível em: <https://elkamehr.com/en/steel-deoxidation-a-comprehensive-analysis/>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- ELKEM. Ferrosilicon for electrical steel. Disponível em: <https://www.elkem.com>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- FRANCISCO, A. M. S. Motores de Indução Trifásicos, 1., 2006. Viseu: Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2006.
- GASIK, M. (Ed.) *Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2013.
- HALVORSEN, S. A. Mathematical modelling – an integrated part of Elkem's continued education for process metallurgists. In: INFACON 7, 1995, Trondheim. Proceedings [...]. Trondheim: [s.n.], 1995. p. 729-738.
- HOU, C.K. Effect of silicon on the loss separation and permeability of laminated steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 162, p. 280–290, setembro 1996.
- HOSSEINPOUR, Ali. *Boron and phosphorus removal from Si-Fe solvent using SiO₂-CaO-Al₂O₃ slag*. 2015. Dissertação (Mestrado) – University of Tehran, Teerã, 2015
- KLEVAN, Ole Svein. Removal of C and SiC from Si and FeSi during ladle refining and solidification. Tese (Doutorado) – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1997.
- LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 1999.
- LÚCIO, A et al. Metalurgia dos ferro-ligas: volume II. Belo Horizonte: UFMG, 1980. 607 p.
- MARRA, K.M; MARRA, L.C; BUONO, V.T.L. Effect of aluminium addition on the magnetic properties of a semi-processed electrical steel. **Materials Research**, v. 19, n. 5, p. 1162-1166, 2016.
- METÁLICO, A. -A. B. D. P. D. F. E. D. S. Estatístico ABRAFE 2024. Site da ABRAFE, 2024. Disponível em: <https://www.abrafe.ind.br/publicacoes/>. Acesso em: 23 Março 2025..
- MINASLIGAS. **Ferro Silício 75**. Disponível em: <https://www.minasligas.com.br>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- MYSTEEL. Daily prices – Ferrosilicon and other raw materials. Disponível em: <https://www.mysteel.net/prices-indices/daily-prices/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

PENG, Hualin et al. Investigating the kinetics, thermodynamic properties, and mechanisms of high-temperature oxidation in ferrosilicon alloys. *Chemical Engineering Journal*, [S.I.], v. 498, 2024. Art. 155473. ISSN 1385-8947.

SOUZA, S. A. de. *Composição Química dos Aços*. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA., 1989. 2^a reimpressão – 2006.

SCHEI, A.; TUSET, J. K.; TVEIT, H. *Production of high silicon alloys*. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.

TRANELL, G.; ANDERSSON, M.; RINGDALEN, E.; OSTROVSKI, O.; STEINMO, J. J. Reaction zones in a FeSi75 furnace – results from an industrial excavation. In: *INTERNATIONAL FERROALLOYS CONGRESS*, 12., 2010, Helsinki. *Proceedings*. Helsinki: [s.n.], 2010.

TUSET, I. K. S. The refining of silicon and ferrosilicon. In: *INTERNATIONAL FERROALLOYS CONGRESS*, 6., 1992, Cape Town. **Proceedings**. Johannesburg: SAIMM, 1992. v. 1, p. 193-199.

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

VASCONCELLOS JÚNIOR, S.S. Análise do efeito do grau de redução sobre as propriedades magnéticas e mecânicas do aço elétrico de grão não orientado 3,3%Si. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

XLS METALS. **Raw materials for the production of ferrosilicon**. [S.I.]: XLS Ferro Alloys, 2023. Disponível em: <https://www.xlsferroalloy.com/news/raw-materials-for-the-production-of-ferrosilicon.html>. Acesso em: 11 abr. 2025.