



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



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

“INCORPORAÇÃO DE SILÍCIO NO FERRO-GUSA”

Ana Karolina Menezes de Almeida

Ouro Preto, janeiro de 2022.

Ana Karolina Menezes de Almeida

“INCORPORAÇÃO DE SILÍCIO NO FERRO-GUSA”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira Metalurgista.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva

Ouro Preto, janeiro de 2022.

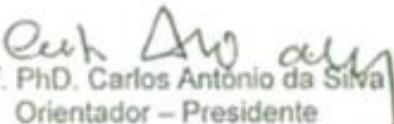


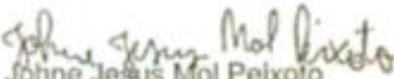
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

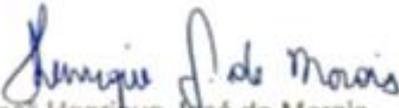
ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos quatorze dias do mês de janeiro de 2022, às 08 horas e 30 minutos, por meio da plataforma de videoconferência Google Meet, foi realizada a defesa de monografia pela aluna *Ana Karolina Menezes de Almeida*, sendo a comissão examinadora constituída pelo Prof. PhD. Carlos Antônio da Silva (Orientador), pelo Prof. DSc. Johne Jesus Mol Peixoto (DEMET/UFOP) e pelo Eng^o Henrique José de Moraes (Gerdau Ouro Branco). A aluna apresentou a monografia intitulada: "Incorporação de silício no ferro gusa". A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo à aluna um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pela aluna.

Ouro Preto, 14 de janeiro de 2022.


Prof. PhD. Carlos Antônio da Silva
Orientador – Presidente


Prof. DSc. Johne Jesus Mol Peixoto
Membro – DEMET/UFOP


Eng^o Henrique José de Moraes
Membro – Gerdau Ouro Branco


Ana Karolina Menezes de Almeida
Aluna

“Confie no SENHOR de todo o coração e não se apoie na sua própria inteligência. Lembre-se de Deus em tudo o que fizer, e ele lhe mostrará o caminho certo.”

Provérbios 3:5-6

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, pelo intelecto, por tantas portas abertas.

Aos meus pais, Edivane e Nilton, e ao meu irmão, Felipe, pelo apoio, compreensão e incentivo.

À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino de qualidade.

Ao Professor Carlos Antônio da Silva pela orientação acadêmica e apoio.

Ao Engenheiro Vitor Maggioni Gasparini pelas oportunidades concedidas, por compartilhar seu conhecimento técnico e pelo exemplo e tutoria.

Ao Engenheiro Luiz Cláudio Lanza Silva, pelo incentivo durante a trajetória, pela generosidade e pela amizade construída.

Ao Engenheiro Henrique José de Moraes, pelo conhecimento e aprendizado compartilhado e pela confiança construída.

Ao químico e escritor Maarten Geerdes, pelo apoio, pela orientação durante minha formação e pela referência que é para mim.

RESUMO

A melhoria do controle do processo de redução em altos-fornos tem sido foco das usinas ao longo do tempo. Diante disso, a busca pela estabilidade operacional do alto-forno e o rigor quanto ao atendimento de qualidade do produto são premissas que têm guiado o processo de fabricação de ferro-gusa. Assim, o teor de silício no ferro-gusa é comumente usado como um dos índices mais representativos do estado térmico de um alto-forno, bem como da qualidade do ferro-gusa que está sendo produzido. A qualidade das matérias-primas, fatores termodinâmicos, variação dos parâmetros operacionais e condições de esgotamento do cadinho são fatores determinantes para a incorporação do silício no gusa, principalmente a produtividade do alto-forno, vazão de sopro, temperatura de chama e volume de escória, conforme mostrado pela regressão múltipla *stepwise* e gráficos de dispersão.

Palavras-chave: Alto-forno. Ferro-gusa. Silício.

ABSTRACT

The improving control of the ironmaking process at blast furnaces has been the focus on the plants over time. In view of this, the search for operational stability of the blast furnace and the rigor to reach the product quality are premises that have guided the ironmaking process. So, the silicon content in the pig iron usually is used as one of the most representative indices of the thermal control of a blast furnace, as well as the quality of the pig iron that is produced. The quality of raw materials, thermodynamic factors and variation of operational parameters are determining factors for the incorporation of silicon in the pig iron. Thus, the quality of raw materials, thermodynamic phenomena, variation in operating parameters and hearth level conditions are determining factors for the incorporation of silicon in pig iron, mainly the blast furnace productivity, blast flow, flame temperature and slag rate, as shown by *stepwise* multiple regression and scatter plots.

Keywords: Blast furnace. Pig iron. Silicon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Fluxo de gás em alto-forno carregado apenas com coque e carregado com camadas alternadas de coque e minério.....	12
Figura 3. 2 - Zonas de um alto-forno.....	13
Figura 3. 3 - Influência da composição química na temperatura de amolecimento e fusão (Ts) e de gotejamento (Td).....	15
Figura 3. 4 - Esquema das zonas de coesão e gotejamento do alto-forno.	17
Figura 3. 5 - Influência da atividade da sílica na velocidade de formação do SiO(g)....	19
Figura 3. 6 - Relação entre o teor de MgO no sínter e o silício no gusa	19
Figura 3. 7 - Reações do silício no alto-forno.	21
Figura 4. 1 - Parâmetros de análise do sínter para o alto-forno.....	22
Figura 4. 2 - Parâmetros de análise do coque metalúrgico.....	22
Figura 4. 3 - Exemplo de interface para o cálculo de carga.	23
Figura 4. 4 - Parâmetros de análise do gusa e escória.....	24
Figura 5. 1 - Carta de controle da produtividade do alto-forno.....	26
Figura 5. 2 - Correlação entre %Si e temperatura do gusa.....	27
Figura 5. 3 - Correlação entre %Si do gusa e %SiO ₂ do sínter... ..	28
Figura 5. 4 - Correlação entre %Si do gusa e %SiO ₂ do minério granulado.....	28
Figura 5. 5 - Correlação entre %Si do gusa e teor de cinza do coque.. ..	29
Figura 5. 6 - Correlação entre %Si do gusa e produtividade do alto-forno.....	29
Figura 5. 7 - Correlação entre %Si do gusa e vazão de sopro do alto-forno.	30
Figura 5. 8 - Correlação entre %Si do gusa e temperatura de chama.....	30
Figura 5. 9 - Correlação entre %Si do gusa e temperatura de topo.	31
Figura 5. 10 - Correlação entre %Si do gusa e volume de escória.....	31
Figura 5. 11 - Correlação entre %Si do gusa e pressão de base do alto-forno.	32
Figura 5. 12 - Correlação entre %Si do gusa e índice de escória.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Composição do sínter para diferentes cenários.	16
Tabela 3. 2 - Análise de vários tipos de pelotas.	16
Tabela 3. 3 - Propriedades físicas dos líquidos no alto-forno.	20
Tabela 5. 1 - Resultados da regressão múltipla <i>stepwise</i>	27

LISTA DE NOTAÇÕES

t_{gusa} – temperatura de gusa;

BB – basicidade binária;

V_{esc} – volume de escória;

TM – tamanho médio;

IR – índice de redutibilidade;

IDR – índice de degradação após redução;

TQ – teste de queda;

TT – teste tambor;

CRI - coke reaction index;

CSR - coke strenght after reaction of CO₂;

DI - drum Index (Índice de Tamboreamento);

MV – matéria volátil.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	11
	2.1 Objetivo geral.....	11
	2.2 Objetivos específicos.....	11
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	12
	3.1 O Alto-Forno.....	12
	3.2 Descrição do processo.....	14
	3.3 Fontes de silício.....	15
	3.4 Incorporação de silício.....	17
	3.5 Redução da sílica.....	18
	3.6 Condições de esgotamento.....	21
4	MATERIAS E MÉTODOS.....	22
	4.1 Análise das matérias-primas.....	22
	4.2 Cálculo de carga.....	23
	4.3 Parâmetros operacionais.....	23
	4.4 Esgotamento.....	24
	4.5 Análise de gusa e escória.....	24
	4.6 Software de análise.....	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
	5.1 Relação entre teor de silício do gusa e nível térmico do alto-forno.....	26
	5.2 Incorporação relacionada às matérias-primas.....	27
	5.3 Relação entre teor de silício do gusa e parâmetros operacionais.....	28
	5.4 Relação entre teor de silício do gusa e condições de esgotamento.....	30
6	CONCLUSÕES.....	34
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

As indústrias buscam incessantemente a redução de seus gastos operacionais, aliando uma gestão eficiente às técnicas que permitam o acesso às informações relevantes durante o processo de fabricação (DINIZ, 2018). No setor siderúrgico, essa necessidade se aplica a todo o processo de fabricação, desde as matérias-primas, até o produto final.

Nesse sentido, tem-se o alto-forno como parte fundamental do processo de fabricação do aço. Este reator é capaz de reduzir e fundir a carga, a fim de entregar o produto principal para obtenção do aço em usinas integradas: o ferro-gusa. A aciaria requer uma qualidade definida para o gusa líquido e a escória tem que ser escolhida pelas propriedades otimizadas com relação à fluidez, capacidade de dessulfuração e assim por diante. Dessa forma, o alto-fornista deve garantir a qualidade dos produtos dentro das especificações definidas (GEERDES, VLIET e TOXOPEUS, 2004).

Para que isso ocorra, é necessário que haja estabilidade operacional e controle do processo. Assim, o teor de silício no gusa é um importante indicador do estado térmico de um alto-forno e, conseqüentemente, impacta os processos seguintes de refino do aço que será produzido.

Visto que os parâmetros operacionais estão associados, alterações nessas variáveis modificam as condições de transferência de silício para o ferro-gusa, que podem impactar no valor agregado do produto, custos associados à sua produção e ao processo de refino do aço, além de possíveis instabilidades operacionais.

Neste trabalho foi realizado um estudo do fenômeno de incorporação de silício ao ferro-gusa e analisada a relação entre o teor de silício incorporado ao metal com diversos parâmetros operacionais.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno de incorporação de silício ao ferro-gusa. Neste trabalho serão utilizados dados reais de alto-forno a coque.

2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar as variáveis operacionais que influenciam a incorporação de silício no ferro-gusa;
- b) Comparar os dados reais de um alto-forno aos previstos pelos fenômenos de incorporação;
- c) Avaliar outros parâmetros a fim de atingir novas correlações importantes.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1. O Alto-Forno

O alto-forno é um reator metalúrgico cujo produto principal é o ferro-gusa, que utiliza carbono, na forma de coque ou carvão vegetal (pode haver injeção de combustíveis auxiliares pelas ventaneiras), para reduzir e fundir os óxidos de ferro presentes na sua carga. O ferro-gusa contém, em geral, entre 4% e 4,5% de carbono (C), 0,2% a 1,0% de silício (Si), além de manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S) e outros elementos e é a principal matéria-prima utilizada nas aciarias a oxigênio para produção de aço (VIEIRA, 2012).

O alto-forno é um reator de contracorrente, isto é, o gás sobe em direção ao topo, enquanto a carga desce em sentido ao cadinho (Figura 3.1). O ar quente soprado pelas ventaneiras (fornece o oxigênio), aliado ao carbono fornecido pelo combustível (coque ou carvão) resultam em monóxido de carbono (CO) na zona de combustão, que será o gás redutor. Além disto, uma enorme quantidade de calor é gerada, devido à combustão do coque e carvão. O calor leva a uma alta temperatura de chama (2.000°C a 2.300°C). Visto que essa temperatura é mais alta do que a temperatura de fusão do ferro e da escória, o calor no gás quente fundirá a carga (GEERDES, VLIET e TOXOPEUS, 2004).

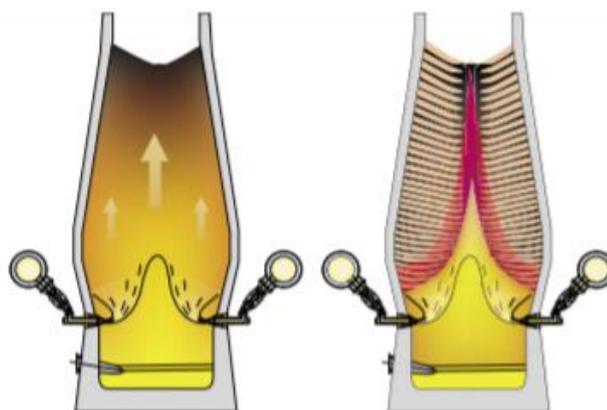


Figura 3.1: Fluxo de gás em alto-forno carregado apenas com coque e carregado com camadas alternadas de coque e minério.

(GEERDES, VLIET e TOXOPEUS, 2004).

O reator possui uma forma cônica típica, dividida em seções, as quais sugerem as fases do processo (Figura 3.2):

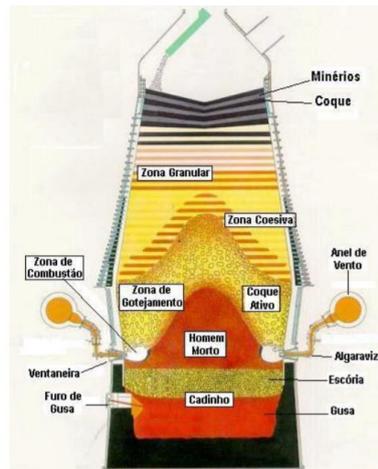


Figura 3.2: Zonas de um alto-forno.

(VRAC, 2007).

A zona granular pode ser compreendida como a região do forno onde a carga é composta pelo combustível (coque ou carvão vegetal); carga metálica (minério de ferro, sínter e pelota); e fundentes (dolomita, calcário, quartzo), fonte dos elementos que corrigem as características da escória (basicidade, volume, viscosidade e temperatura). Nessa região coexistem duas fases: sólidos e gases (MACHADO, 2009).

A zona de amolecimento e fusão (localizada logo abaixo da zona granular) é definida pelas temperaturas de início de amolecimento e final de fusão dos componentes da carga metálica. Visto que essa fase envolve transição física, essa região provoca uma elevada resistência à passagem dos gases, sendo responsável por uma elevada perda de pressão na coluna do forno (piora da permeabilidade). Essa região (zona coesiva) pode definir a performance do alto-forno de acordo com sua espessura, forma e posição. O formato, localização e dimensões desta zona são funções de combinação de vários parâmetros operacionais: distribuição granulométrica, espessura e angulação das camadas dos componentes da carga; condições de sopro (temperatura, teor em oxigênio, umidade, vazão do ar soprado e tipo e taxa de injeção de combustíveis auxiliares), entre outros (VIEIRA, 2012 *apud* PATNAIK, 2010). Os aspectos relacionados à zona coesiva influenciam diretamente o consumo de combustível, distribuição do fluxo gasoso, movimento da carga e cinética das reações químicas e da operação do cadinho/drenagem de gusa (MACHADO, 2009).

Já a zona de gotejamento (localizada entre a zona de amolecimento e fusão e a região das ventaneiras) envolve a fusão dos materiais metálicos, as reações de incorporação dos elementos não ferrosos (silício, manganês, enxofre, carbono e o fósforo) ao ferro-gusa, a

maior parte da dessulfuração do gusa e a parcial transformação do coque ou carvão vegetal, no estado sólido, em monóxido de carbono (MACHADO, 2009). A partir dessa região, o metal líquido (gusa) desce por entre as partículas de carvão ou coque, dividindo espaço com os gases ascendentes da região das ventaneiras. Assim, coexistem três fases: sólida, líquida e gasosa.

3.2. Descrição do processo

De acordo com GEERDES, VLIET e TOXOPEUS (2004, p. 74), “todos os dias, ou até mesmo em todos os turnos de trabalho, o processo tem que ser controlado”. O controle operacional do alto-forno envolve o conhecimento das reações e formação das zonas no interior de forma a fim de garantir a estabilidade do alto-forno (LANZA, 2002). Os principais parâmetros a serem acompanhados:

- Composição adequada do gusa e da escória: a carga metálica e o coque são ajustados para se obter a composição química do gusa e da escória conforme especificação. O controle da basicidade da escória é fundamental: efeito da dessulfuração do metal, viscosidade e ponto de *liquidus*. A composição correta do ferro e da escória também implica no controle do nível térmico, uma vez que o teor de silício do gusa está relacionado à temperatura de tal.

Portanto, é necessário fazer cálculos de carga (leito de fusão) a cada análise química atualizada dos componentes das matérias-primas, assim como dos produtos (gusa e escória) a cada corrida. Assim, é possível realizar ajustes frequentes do nível térmico do forno.

- Descida/puxada de carga: a produtividade e a eficiência do alto-forno são avaliadas com base em dados diários. As condições da zona de combustão são monitoradas ou calculadas (temperatura de chama, por exemplo). A visão geral total do processo indica a necessidade ou não de ajustes.
- Fluxo gasoso: o caminho percolado pelo gás ao longo do corpo do alto-forno pode ser monitorado por meio do acompanhamento da temperatura do gás de topo, temperatura das lanças radiais, composição global do gás de topo e rendimento de CO, perdas térmicas e fluxo do gás pela parede. A temperatura do gás de topo é um parâmetro importante: em casos de temperaturas baixas ($< 100^{\circ}\text{C}$), a carga ainda não estará seca e será necessário um fluxo de gás ainda maior na região da parede para aumentar a capacidade de secagem da carga nessa região. Para ajuste do fluxo de gás, o uso da

distribuição da carga pode ser considerado. Entretanto, as perdas térmicas são muito sensíveis a decida da carga: uma decida irregular da carga leva a aberturas (espaços vazios) na parede, o que eleva a perda térmica.

3.3. Fontes de silício

Tratando-se dos materiais metálicos, é desejável uma carga rica em ferro (alto teor de Fe). Além disso, há fatores químicos, físicos e metalúrgicos a serem considerados. Visto que a alimentação de finos de minério é indesejável (piora da permeabilidade do gás), os materiais usuais são sínter, pelotas e minérios granulados, em proporções distintas (em geral, a participação de sínter é a maior no leito).

As exigências para a carga do alto-forno se estendem para: a composição química da carga, pois após os processos de redução e fusão, a composição correta do gusa e escória tem que ser feita. As propriedades da carga têm que ser tais que o oxigênio da carga possa ser removido. Também, o atendimento aos parâmetros de qualidade física, a fim de não prejudicar a permeabilidade ao fluxo de gás (GEERDES *et al.*, 2020).

A Figura 3.3 mostra a relação entre a composição química e propriedades de amolecimento e fusão.

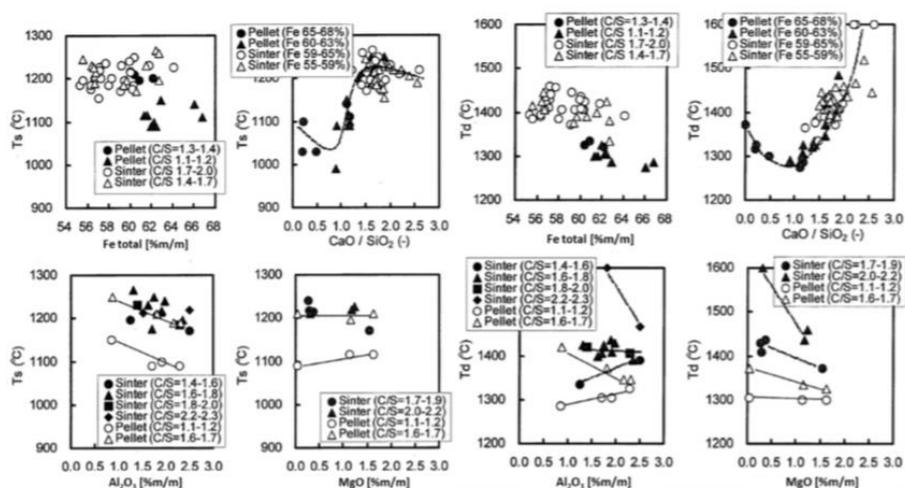


Figura 3.3: Influência da composição química na temperatura de amolecimento e fusão (Ts) e de gotejamento (Td).

(HIGUCHI *et al.*, 2006)

É apresentada a composição típica do sínter na Tabela 3.1 e da pelota na Tabela 3.2:

Tabela 3.1: Composição do sinter para diferentes cenários.

(GUILHERME, 2012).

Composição do sinter	Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
CaO (%)	6,70	6,79	6,94	6,75	6,74	6,74
MgO (%)	1,20	1,20	1,20	1,21	1,21	1,21
SiO ₂ (%)	5,17	5,17	5,17	5,21	5,21	5,21
Al ₂ O ₃ (%)	3,81	3,81	3,81	3,84	3,84	3,84
C (%)	0,34	0,30	0,28	0,24	0,24	0,25
Fe ₂ O ₃ (%)	82,64	82,56	82,48	82,67	82,69	82,68
Fe ₃ O ₄ (%)	0,10	0,09	0,05	0,01	0,01	0,01

Tabela 3.2: Análise de vários tipos de pelotas.

(GEERDES, VLIET e TOXOPEUS, 2004).

Tipo	Basicidade CaO/SiO ₂	Fe%	SiO ₂ %	MgO%
Pelotas ácidas	< 0,15	64–67%	2–5%	<0,2%
Pelotas olivina	< 0,15	64–67%	2,5–5%	1,3–1,8%
Pelotas básicas	~ 0,8–1,0	60–64%	3,5–5,5%	1,3%
Pelotas fundentes	~ 1,1–1,3	60–63%	3,5–5,5%	1,5%

É evidente a relevância do teor de sílica nesses materiais. Sendo assim, a carga metálica se torna um considerável fornecedor de silício para processo (redução da sílica), principalmente pela massa de tal: a relação minério/gusa média é de 1,65kg/t_{gusa}, isto é, são necessários 1650kg de materiais metálicos para produzir 1000kg de ferro-gusa.

Além disso, há a contribuição do coque. Este desempenha funções importantes no processo de fabricação de ferro-gusa: fornece carbono para geração de gás redutor (principalmente CO); sua combustão gera o calor necessário para fundir a carga; promove maior permeabilidade da carga (quando comparado à camada de materiais metálicos); fonte de carbono para carbonização do metal. O processo de fabricação do coque (coqueificação) se dá a partir da destilação por pirólise ou decomposição térmica do carvão mineral, na ausência de ar, que após o desprendimento da matéria volátil obtêm-se um resíduo sólido, poroso e carbonoso denominado coque (VRAC, 2016).

A partir disso, é válido ressaltar um importante índice qualitativo do carvão mineral (ALVES, 2017): o “grade”, que mede de forma inversamente proporcional o percentual

em massa de matéria mineral incombustível (cinza) presente na camada carbonífera. Daí, tem-se mais uma fonte de silício para o alto-forno: a sílica proveniente da cinza do coque (e do carvão). Em geral, a cinza do coque contém entre 45% e 50% de sílica (GEERDES *et al.*, 2020).

3.4. Incorporação do silício

No caso de usinas integradas, a operação do convertedor é otimizada quando a variação de teor de silício entre as corridas é pequena. Portanto, é importante a constância do teor de silício e atendimento às especificações, o que exige um controle operacional apurado do alto-forno. Além disso, o silício no metal quente é um indicador sensível do estado térmico do alto-forno e pode ser usado para analisar a consistência do processo. Para tal, torna-se necessário o conhecimento dos fatores que influenciam a incorporação de silício no gusa (LANZA, 2001).

Resultados de dissecação de fornos mostraram que o silício é incorporado ao gusa na zona de gotejamento (Figura 3.4), atingindo o seu valor máximo frente às ventaneiras. A partir dessa região, o teor diminui devido à oxidação do silício do gusa ao passar pela camada de escória no cadinho.

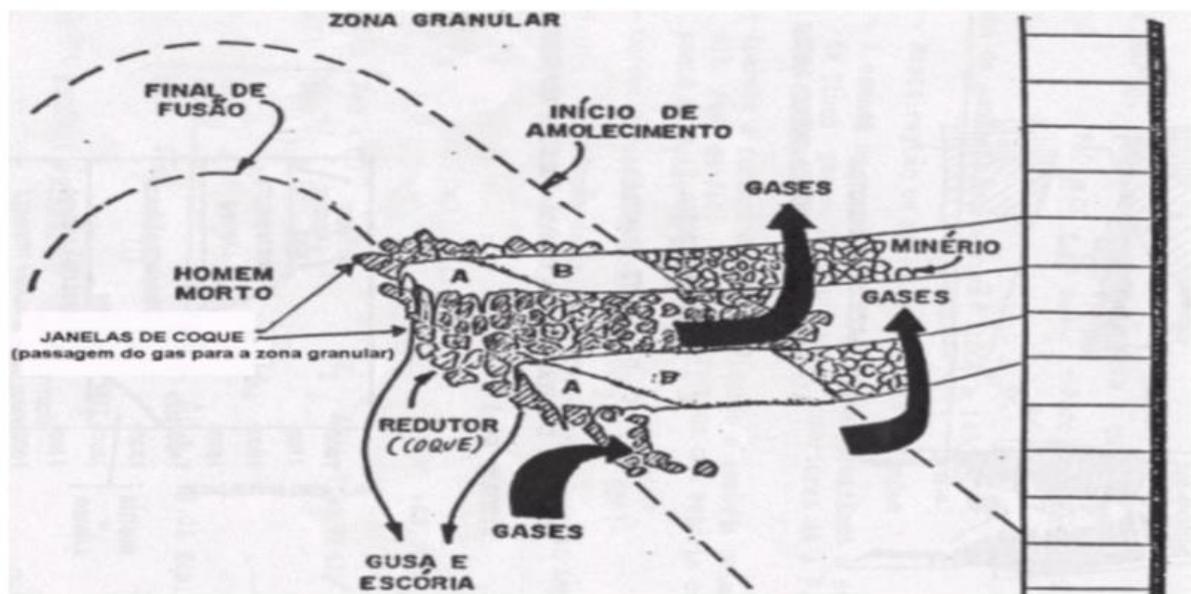


Figura 3.4: Esquema das zonas de coesão e gotejamento do alto-forno.

(VRAC, 2021).

3.5. Redução da sílica

Os óxidos de silício são reduzidos pelo carbono a temperaturas acima de 1400°C. O processo de incorporação pode ser dividido em dois estágios (GEERDES *et al.*, 2020):

No primeiro estágio, há a formação de monóxido de silício: ocorre a temperaturas muito altas, frente às ventaneiras na zona de combustão. O SiO é formado a partir da sílica, conforme a Equação 3.1.



No segundo estágio, à medida que o gás SiO sobe através da zona de gotejamento, o silício é reduzido pelo coque e dissolvido no gusa, de acordo com as Equações 3.2 e 3.3.



Portanto, o teor de silício do gusa depende tanto da reação de formação do SiO_(g), quanto da reação de incorporação do silício no gusa. Diante disso, foram estabelecidos parâmetros operacionais que influenciam essas reações (LANZA, 2001):

- Temperatura de chama: O aumento da temperatura de chama favorece a reação de formação do SiO_(g).
- Pressão de base: O aumento da pressão de base causada pelo aumento da contra pressão, pela redução da permeabilidade e/ou retenção de gusa e escória, inibe a formação do SiO_(g), conseqüentemente reduz o teor de silício no gusa. Esse efeito é diferente daquele observado com o aumento do teor de Si no gusa pela elevação do estado térmico do alto-forno, o qual também produz uma elevação de pressão de base.
- Teor de cinza do coque: Quanto maior o teor de cinza do coque, maior a quantidade de SiO₂ reduzida e transformada em SiO_(g), portanto maior o teor de Si no gusa.

Diante da Equação 3.1, tem-se que quanto maior a atividade da sílica da escória, maior a quantidade de SiO gasoso produzido (Figura 3.5).

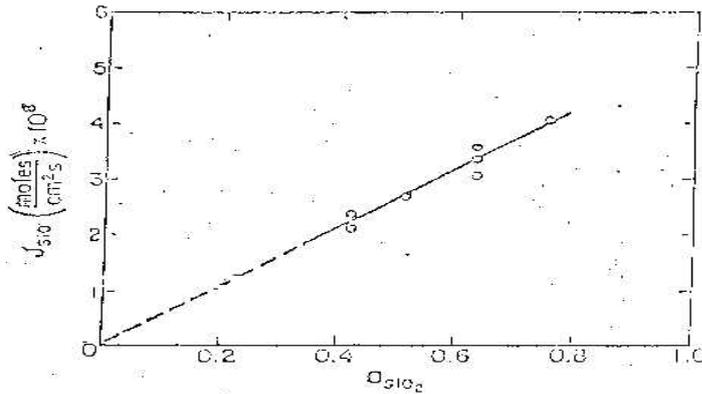


Figura 3.5: Influência da atividade da sílica na velocidade de formação do $\text{SiO}_{(g)}$.
(LANZA, 2001).

O silício do metal está em equilíbrio com a escória, por isso, aspectos da escória exercem forte influência sobre a incorporação de tal. Considerando os principais componentes da escória de alto-forno, percebe-se a forte relação com o óxido de magnésio.

O MgO tem efeito no teor de silício no gusa em dois sentidos: o aumento do teor de MgO na escória, diminui a atividade da sílica. Além disso, o aumento do teor de MgO nas matérias-primas (principalmente no sinter) desloca a zona coesiva para baixo, reduzindo a zona de gotejamento e consequentemente o teor de silício no gusa (Figura 3.6).

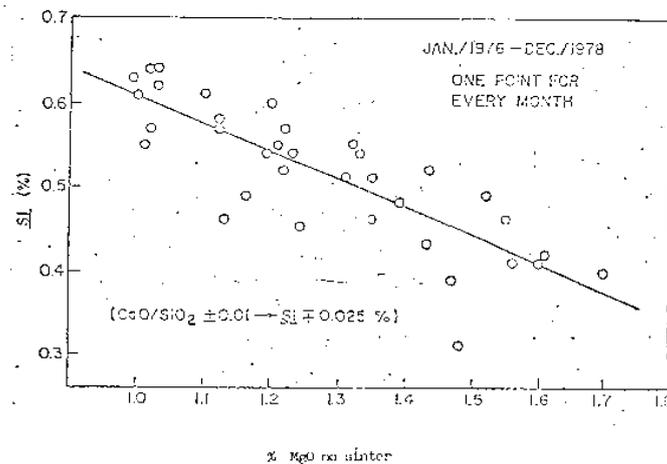


Figura 3.6: Relação entre o teor de MgO no sinter e o silício no gusa.
(LANZA, 2001).

Das Equações 3.2 e 3.3, tem-se a incorporação do silício a partir do SiO gasoso. Esta incorporação é diretamente proporcional ao tempo e à área de contato do gusa com tal.

Diante disso, a incorporação do silício está ligada diretamente a altura da zona coesiva, volume de produção e propriedades do coque (LANZA, 2001).

- Altura da zona coesiva: quanto mais intenso for o contato entre o gusa e o gás, mais alto será o teor de silício, assim quanto maior for a distância do gotejamento do gusa, mais intenso será o contato entre os gases quentes e metal líquido, o que leva a temperaturas mais altas do metal. O contato mais prolongado permite que mais gás SiO reaja com o carbono, o que leva a teores mais altos de silício no gusa. Assim, uma zona coesiva numa posição mais alta está relacionada com uma temperatura alta do gusa e um silício alto (GEERDES, VLIET e TOXOPEUS, 2004).
- Volume de produção: quanto maior o volume de produção (no sentido da puxada de carga), menor é o tempo de residência do gusa na zona de gotejamento, reduzindo assim a incorporação do silício no gusa. Analogamente, quando o volume de sopro é reduzido, o teor de silício do gusa aumenta. Desse modo, a residência das gotas de escória e de gusa vão impactar a incorporação dos elementos ao gusa e a evolução da composição da escória.
- Propriedades do coque: quanto maior a distribuição granulométrica do coque, menor é a porosidade do leito. Portanto, a passagem do gás na zona de gotejamento é prejudicada, aumentando o tempo de contato entre o gás e o gusa, elevando assim a incorporação do silício no gusa.

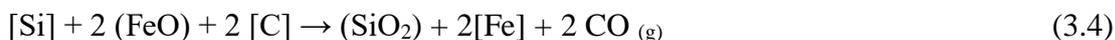
A respeito da escória, há ainda mais um fator relevante. Devido à diferença de densidade entre gusa e escória, isto é, a densidade da escória ser muito inferior (Tabela 3.3), a camada de escória está disposta acima do gusa no cadinho (ASSIS, 2021).

Líquido	Densidade ρ (kg.m ⁻³)	Viscosidade μ (Pa.s)
Gusa	6600	0,005
Escória	2600	0,3

Tabela 3.3: Propriedades físicas dos líquidos no alto-forno.

(GANDRA, 2006).

Assim, quando as gotas de gusa passam pela camada de escória, o silício poderá ser reoxidado se houver FeO presente na escória.



Em geral, é encontrado FeO na escória quando o nível térmico do alto-forno abaixa. Nesse caso, a escória se torna mais densa e, após ser granulada, mais escura. Dessa forma, o teor de silício no gusa é muito baixo (GEERDES *et al.*, 2020).

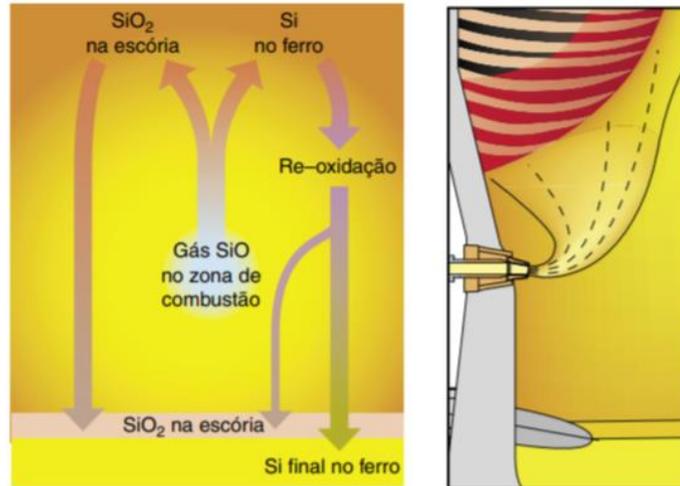


Figura 3.7: Reações do silício no alto-forno.

(GEERDES *et al.*, 2020).

3.6. Condições de esgotamento

Deve-se considerar também a variação do silício com o esgotamento do alto-forno, isto é, ciclos de drenagem do cadinho. O silício no gusa varia de corrida a corrida e ao longo da corrida também. Alterações de entrada e saída de energia se manifestam no silício. Assim, silício estável é resultado de condições operacionais estáveis, principalmente a estabilidade da descida de carga. Se a descida não é suave, a redução da carga varia, resultando em redução direta nas regiões de altas temperaturas abaixo da zona coesiva. Nesse caso, a reoxidação do silício vai variar mais (GEERDES *et al.*, 2020).

Outra condição de esgotamento do cadinho que exerce forte influência, é a ocorrência de uma retenção de escória, que leva à diminuição do teor silício do gusa. Isso se deve à elevação da pressão de base decorrente da retenção de escória e ao aumento da camada de escória no cadinho, levando a um maior tempo de contato gusa/escória e consequente reoxidação do silício do gusa, transformando-o em sílica na escória.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com o intuito desse trabalho, foram utilizados dados reais de um alto-forno a coque para estabelecer as correlações mencionadas na revisão bibliográfica. Assim, foi realizada a análise referente ao período de janeiro a dezembro de 2020.

4.1. Análise das matérias-primas

A qualidade das matérias-primas é uma informação fundamental. Por isso, foram obtidos os dados referentes ao sinter e coque.

O resultado da análise do sinter é dado 3 vezes ao dia, a cada 8 horas. Este se refere à 4 incrementos de material, compondo a amostra de sinter, no intervalo de 8 horas. Diante do interesse em conhecer o teor de sílica, foi abordada a análise química.

A análise química do sinter (Figura 4.1) é obtida por via úmida e por raios x: a amostra bruta é peneirada, a seguir, compõe-se a amostra para a preparação para análise química, proporcionalmente à granulometria. Essa amostra sofre processos sucessivos e intercalados de redução e tamanho, homogeneização e divisão, até se obter a amostra nas quantidades e granulometrias adequadas para análise química por via úmida e por raios x.

Química												Metalúrgica				Granulométrica						
FeT	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	MnT	P	S	TiO2	FeO	BB	Vesc	IR	IDR	TQ	TT	50	25	19	10	5	<5	TM

Figura 4.1: Parâmetros de análise do sinter para o alto-forno.

O coque metalúrgico requer um intervalo maior para realização dos ensaios e obtenção de todos os resultados requeridos, isto é, parâmetros físicos, químicos e metalúrgicos. Assim, é realizada 1 análise por dia (Figura 4.2).

<25	>25	<75	>75	CRI	CSR	Cinza	DI	Fundo	H2O	MV	S	TM
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------	----	-------	-----	----	---	----

Figura 4.2: Parâmetros de análise do coque metalúrgico.

Conforme consideração para o sinter, o foco foi dado à fonte de sílica, ou seja, ao parâmetro “cinza”. A amostra é peneirada e a granulometria é determinada. As amostras para os respectivos ensaios são compostas empregando o processo de pesagem proporcional. A amostra preparada é calcinada em mufla (por 24 horas) e a cinza é enviada para análise química por via úmida.

4.2. Cálculo de carga

Com base nas informações enviadas pelo laboratório, os resultados são utilizados para elaboração de um novo leito de fusão (Figura 4.3), baseado no balanço de massa dos materiais utilizados, suas composições e proporções. Diante desses dados, foram analisados os leitos estabelecidos, além da qualidade dos materiais citados.

The screenshot shows a software interface for calculating furnace load. It is divided into several sections:

- Valores Gerais:** A grid of input fields for parameters such as BZ, SI, Cinza Coque, Cinza PCI, Vazão de ar, Temp. Sopros, Produção Dia, Turno, Alt Coque Ventre, Peso Úmido, Peso Superv., Umid. Sopros, and Carga.
- Obs:** A note stating "Formatos válidos devem ser positivos, separados por '.' virgula".
- Table:** A table with columns: Material, Peso (Kg), Passante, Consumos Específicos (Kg), Umidade (%), and % Coque. The first row is highlighted in blue and contains "GÁS NATURAL DISTR. (COMBUST. ALT.)". Other rows include "CALCÁRIO CALCÍTICO", "CARVÃO SIB SIBANTHRACITE PCI COAL", "CARVÃO SBP BATCHATSKYI PCI", "COQUE METALÚRGICO", "COQUE ESPECIAL I", "PELOTAS 8 A 16 MM RODOVIÁRIO", "MIX DE MINÉRIO FERRO GRANULADO", "SINTER ALTO FORNO II", "QUARTZO", and "SINTER PATIO".
- Resultado:** A section with calculated values for: Carga Total (kg), Total Minério (kg), Escória (kg), % Sinter, % Minério, Minério/Coque, Gusa Carga (kg), Minério/Gusa, PCI Rate (kg/t), % Pelota, Coque Rate (kg/t), Small Rate (kg/t), Large Rate (kg/t), Gás Natural Rate (kg/t), Slag Rate (kg/t), Alumina (%), Magnésia (%), Fac. Calcário (kg), and Fuel Rate (kg/t).
- Correção:** A section with correction values for: Calcário (kg), Quartzo (kg), S Carregado (kg/t), Coq. Rate Cor. (kg/t), Dif Coq. Rate (kg/t), and TiO2 Carreg. (kg/t).

Figura 4.3: Exemplo de interface para o cálculo de carga.

4.3. Parâmetros operacionais

A operação de um alto-forno exige um controle rigoroso dos parâmetros operacionais. Isso exige confiabilidade da instrumentação, informação e armazenamento de dados.

Diante disso, foram analisados os dados referentes ao período estipulado provenientes do banco de dados. A base tecnológica do sistema abrange toda a rota de processo de alto-forno, desde o sopros de ar quente até o manuseio de matéria-prima, incluindo o forno propriamente dito, a área de corrida, e esgotamento do cadinho. A frequência dos dados analisados foi diária.

Os seguintes parâmetros operacionais foram analisados:

- Produtividade (t/dia.m³);

- Vazão de sopro (Nm^3/min);
- Temperatura de chama ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura de sopro ($^{\circ}\text{C}$).

Além destes, parâmetros operacionais relacionados também foram avaliados a fim de atingir novas correlações importantes.

4.4. Esgotamento

As condições de esgotamento foram avaliadas por meio dos dados referentes às corridas:

- Volume de escória/ slag-rate ($\text{kg}/\text{t}_{\text{gusa}}$);
- Índice de escória;
- Pressão de base (kg/cm^2).

4.5. Análise de gusa e escória

A cada corrida de gusa, é realizada a análise de gusa e escória. Esta corresponde à média das análises de cada carro torpedo de determinada corrida que foi enviada à aciaria.

A amostra é retirada em coquilhas, exigindo preparação para ser analisada somente para o gusa. A amostra de escória dispensa preparação (amostrador não necessita de preparação). A análise é realizada pelo método de raios x, por espectrômetros óticos. Os resultados de análise de gusa e escória (Figura 4.4) são enviados tanto para o alto-forno, quanto para aciaria.

Gusa								
Corrida	Carro torpedo	%Si	%P	%Mn	%S	%Ti	Tgusa	Peso
Escória								
Corrida	%CaO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%MgO	%MnO	%TiO ₂	%FeO	BB

Figura 4.4: Parâmetros de análise do gusa e escória.

Finalmente, o resultado de silício do gusa será comparado aos parâmetros mencionados neste trabalho.

4.6. Software de análise

As correlações foram estabelecidas por meio do software “Minitab”.

O Minitab é um programa voltado para fins estatísticos, desenvolvido em 1972, e é o *software* líder escolhido para ser usado no ensino de estatística em mais de 4 mil faculdades e universidades em todo o mundo (MINITAB, 2021).

Por sua interface simples, mas com a capacidade de executar análises estatísticas complexas, foi selecionado (versão 2019) para realização de cartas de controle e determinação de causas especiais: tais causas serão descartadas do banco de dados para análise. Principalmente por se tratar de um reator susceptível a variações pontuais, como paradas não programadas, e distúrbios operacionais, como engaiolamentos e/ou arriamentos, os dados foram previamente tratados.

Para estudar a relação entre os parâmetros e o teor de silício, foi utilizada a ferramenta de regressão múltipla *stepwise*, além do gráfico de dispersão para uma representação gráfica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados dados diários (média/dia) dos parâmetros de um alto-forno a coque: o período selecionado para análise foi de janeiro a dezembro de 2020. Foram expurgados os dados referentes aos retornos de paradas emergenciais e programadas, além de produtividade inferior a $1,8 \text{ t/dia.m}^3$ (eventos ou instabilidades que impactaram na redução da marcha do alto-forno).

A Figura 5.1 mostra a evolução da produtividade ao longo do período, resultante dos dados já tratados, apresentando a produtividade média de $2,3 \text{ t/dia.m}^3$.

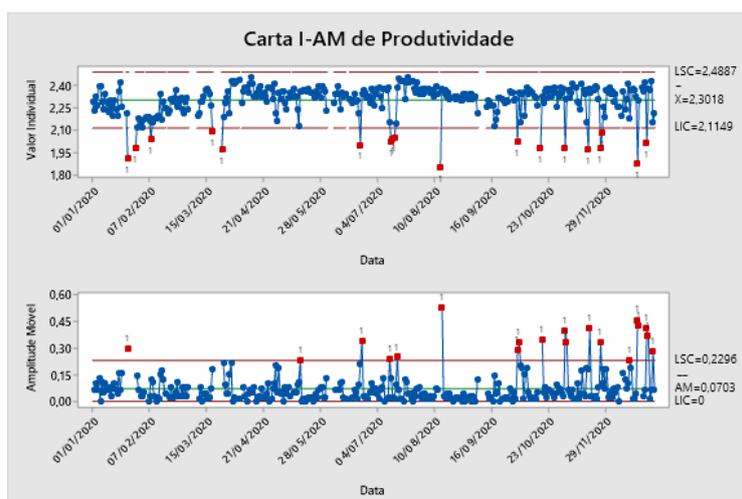


Figura 5.1: Carta de controle da produtividade do alto-forno.

Foram analisados 8 parâmetros, que envolvem as matérias-primas, parâmetros operacionais e de esgotamento. A equação de regressão e os coeficientes obtidos a partir da regressão múltipla *stepwise* estão apresentados na Tabela 5.1. Os valores-T (em módulo) e valores-P (próximos de zero) identificaram a significância estatística da relação entre o teor de silício e os demais parâmetros.

Tabela 5.1: Resultados da regressão múltipla *stepwise*.

Método

Linhas não usadas 115

Seleção Stepwise de Termos

α para entrada = 0,15; α para remoção = 0,15

Equação de Regressão

%Si gusa = -3,177 - 0,001404 Slag-rate + 0,001667 Temperatura de chama - 0,2114 Produtividade
 - 0,000284 Vazão de sopro - 0,01026 %SiO₂ granulado + 0,001184 Temperatura gusa
 + 0,000767 Temperatura de topo

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-3,177	0,707	-4,49	0,000	
Slag-rate	-0,001404	0,000431	-3,26	0,001	1,13
Temperatura de chama	0,001667	0,000262	6,37	0,000	1,33
Produtividade	-0,2114	0,0526	-4,02	0,000	1,68
Vazão de sopro	-0,000284	0,000055	-5,20	0,000	4,66
%SiO ₂ granulado	-0,01026	0,00480	-2,14	0,034	1,14
Temperatura gusa	0,001184	0,000390	3,04	0,003	1,23
Temperatura de topo	0,000767	0,000429	1,79	0,075	1,05

5.1. Relação entre teor de silício do gusa e nível térmico do alto-forno

A relação estabelecida sobre a incorporação de silício no gusa e temperatura do gusa é confirmada na Figura 5.2: o teor de silício é forte indicador do nível térmico de um alto-forno.

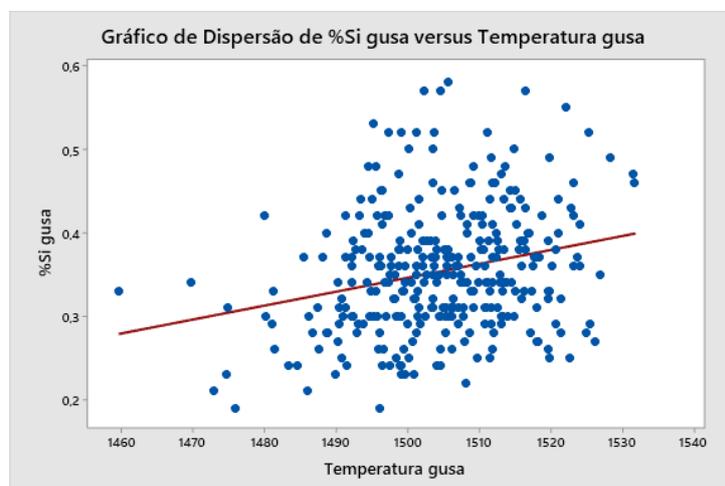


Figura 5.2: Correlação entre %Si e temperatura do gusa.

5.2. Incorporação relacionada às matérias-primas

Para avaliar a correlação entre a incorporação de silício do gusa com as matérias-primas, foram estabelecidas a relação entre a sílica proveniente do sinter (Figura 5.3) e da cinza do coque (Figura 5.5).

5.3. Incorporação relacionada às matérias-primas

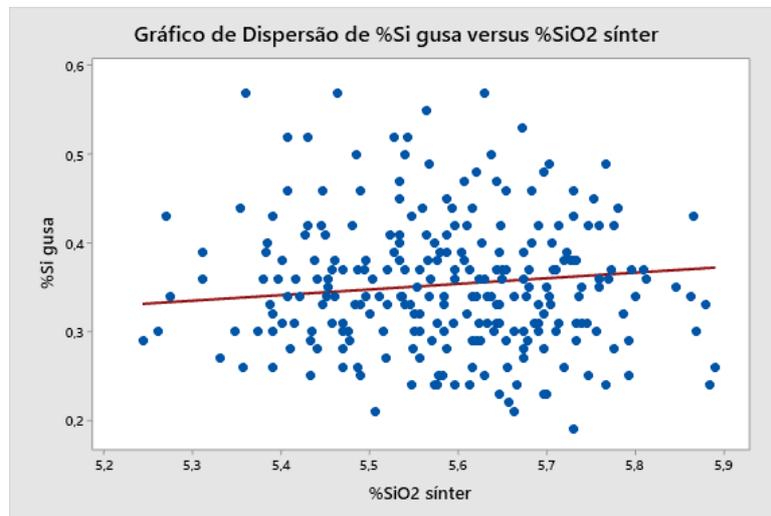


Figura 5.3: Correlação entre %Si do gusa e %SiO₂ do sinter.

A saber, o valor médio da participação de sinter na carga metálica do alto-forno foi de 83,15% no período analisado. Isso mostra a representatividade desse material como fonte de silício (sílica). A Figura 5.3 mostra a fraca relação entre fonte e produto. Além disso, foi analisada em relação ao minério granulado (Figura 5.4). Nesse caso, a relação foi no sentido inverso.

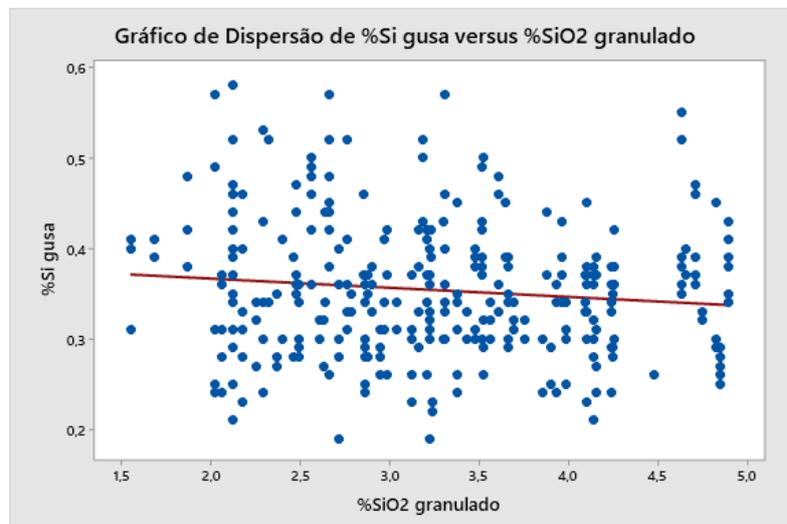


Figura 5.4: Correlação entre %Si do gusa e %SiO₂ do minério granulado.

Considerando a cinza do coque, a Figura 5.5 mostra a correlação proporcional. Entretanto, os valores da cinza concentram em certa faixa, o que interfere na força da relação (fraca), conforme esperado pelo resultado da regressão.

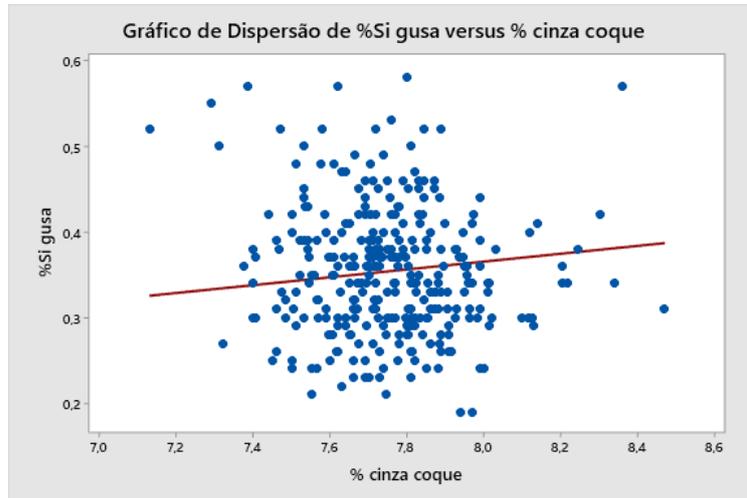


Figura 5.5: Correlação entre %Si do gusa e teor de cinza do coque.

5.4. Relação entre teor de silício do gusa e parâmetros operacionais

Considerando a tempo de residência da carga e consequente tempo de incorporação de silício, foram analisados os parâmetros relacionados à velocidade de descida de carga.

A Figura 5.6 apresenta a relação com a produtividade:

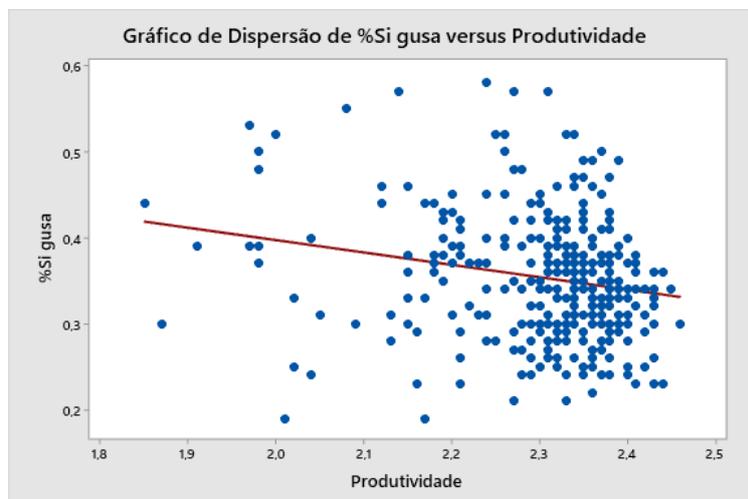


Figura 5.6: Correlação entre %Si do gusa e produtividade do alto-forno.

A figura mostra que para valores de produtividade elevados ($> 2,38$ t/dia.m³), o teor de silício máximo foi inferior aos praticados no patamar de produtividade média. Dessa

forma, a correlação em sentido inverso é confirmada para tal parâmetro, indicando o impacto na incorporação de silício.

Conforme a Figura 5.7, a vazão de sopro também confirma a relação inversa com a incorporação de silício, reafirmando a hipóteses de forte correlação desta com o tempo de residência da carga.

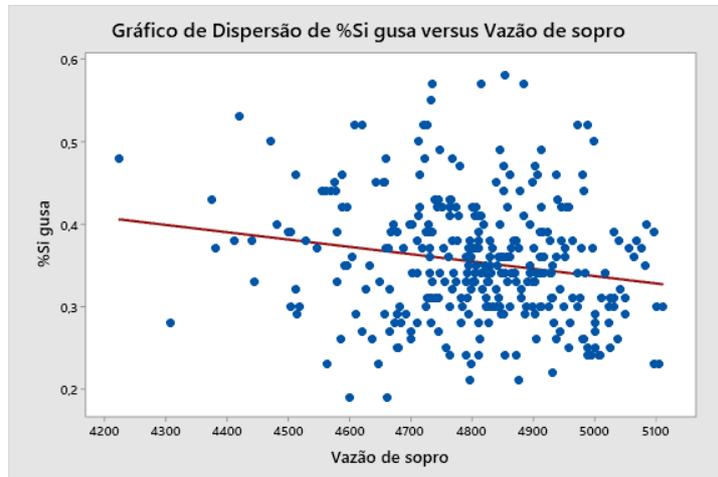


Figura 5.7: Correlação entre %Si do gusa e a vazão de sopro do alto-forno.

A Figura 5.8 apresenta a correlação entre %Si no gusa e a temperatura de chama (°C).

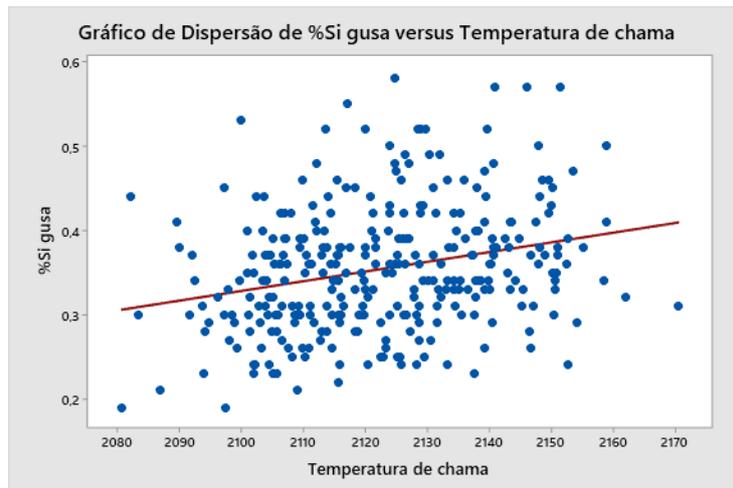


Figura 5.8: Correlação entre %Si do gusa e temperatura de chama.

Diante do favorecimento termodinâmico da temperatura para a reação de formação do SiO (g), é notada a relação direta entre temperatura de chama e incorporação de silício ao metal. Os resultados da regressão confirmam tal significância estatística.

Foi analisada a correlação do teor de silício com a temperatura de topo na Figura 5.9, a fim de obter relação com o deslocamento das isotermas do alto-forno.

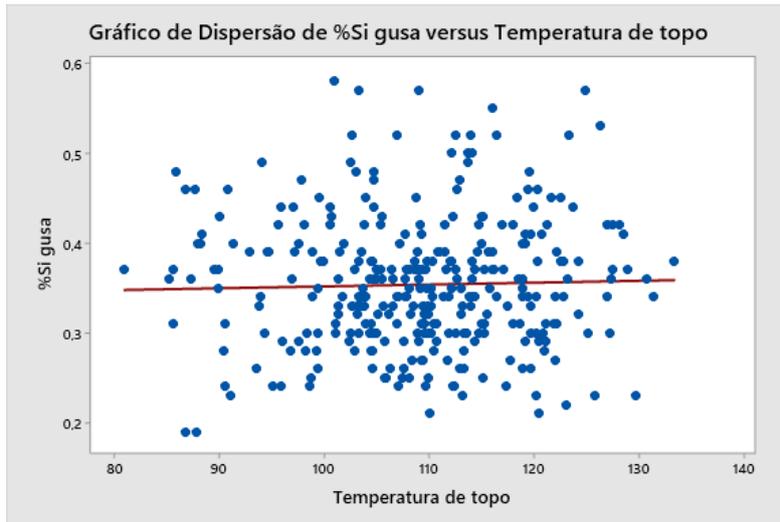


Figura 5.9: Correlação entre %Si do gusa e temperatura de topo.

Conforme apresentado, não foi obtida forte relação com esse parâmetro. Isso se deve ao fato da umidade das matérias-primas e do percentual de oxigênio de enriquecimento do ar de sopro exercer mais forte influência na temperatura de topo, do que a altura da zona coesiva (e demais isotermas).

5.5. Relação entre teor de silício do gusa e condições de esgotamento

Considerando também a variação do silício com o esgotamento do cadinho, foram analisados parâmetros relativos ao volume de líquidos e sua drenagem.

A Figura 5.10 apresenta a correlação entre o teor de silício e o volume de escória.

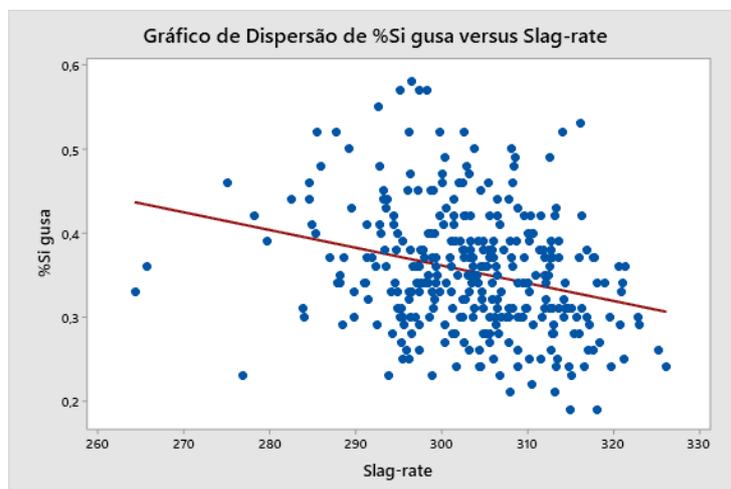


Figura 5.10: Correlação entre %Si do gusa e volume de escória.

Conforme tendência esperada, o teor de silício tem relação inversa ao volume de escória, diante do aumento da camada de escória no cadinho e reoxidação do silício.

No sentido do tempo de contato entre gusa e escória, a ocorrência de retenção de escória no cadinho foi avaliada por meio da pressão de base, na Figura 5.11.

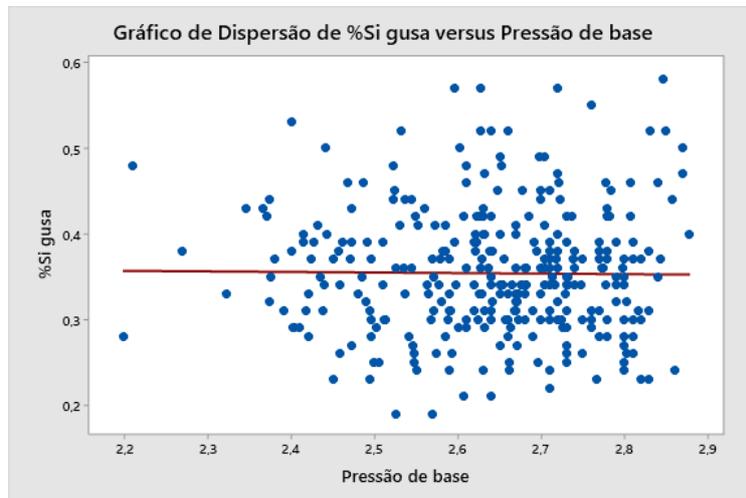


Figura 5.11: Correlação entre %Si do gusa e pressão de base do alto-forno.

Além disso, o tempo de contato entre gusa e escória também foi avaliado pelo índice de escória, isto é, proporção do tempo de corrida que foi drenado escória, na Figura 5.12, permitindo estabelecer relação com retenção de escória no cadinho.

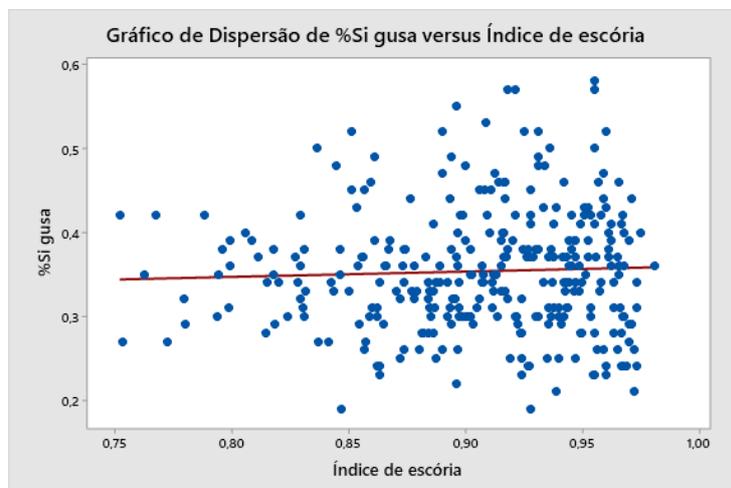


Figura 5.12: Correlação entre %Si do gusa e índice de escória.

Diante dessas duas análises, não foi possível estabelecer forte correlação com tais parâmetros. Isso pode ser justificado pelas inúmeras variáveis do reator que podem influenciar esses parâmetros, como permeabilidade do alto-forno e vazão de sopro para o

primeiro (ou seja, elevação da pressão de base por causas não relacionadas diretamente ao volume de escória) e corridas longas/ baixa vazão de drenagem para o segundo.

6 CONCLUSÕES

O conhecimento do fenômeno de incorporação de silício ao ferro-gusa é muito importante. Sua importância é ressaltada diante da busca pela estabilidade operacional do alto-forno e o rigor quanto ao atendimento de qualidade do produto. Isto também contribui para tomada de decisão quanto ao ajuste mais adequado dos parâmetros operacionais.

Diante das correlações obtidas, pode-se considerar o teor de silício como um índice representativo do estado térmico de um alto-forno a coque.

Os parâmetros analisados mostraram que a incorporação do silício no gusa está fortemente relacionada à marcha do alto-forno, isto é, ao ritmo de produção, conforme evidenciado pela correlação com produtividade e vazão de sopra.

Por outro lado, a relação com as matérias-primas foi pouco significativa. Desse modo, é possível concluir que os ajustes de parâmetros operacionais são capazes de corrigir o impacto na transferência de silício para o gusa. Isso pode ser mostrado pela baixa correlação com a SiO_2 carregada, em comparação à forte correlação com a temperatura de chama.

Quanto aos parâmetros de esgotamento do cadinho, o volume de escória se mostrou bem relevante em relação ao teor de silício no gusa. Embora os demais parâmetros não demonstraram correlação significativa quando analisados isoladamente, é necessário considerar o conjunto de fatores para estabelecer se há a retenção de escória no cadinho e conseqüente impacto no silício.

Portanto, a incorporação de silício no gusa pode ser controlada através de certas variáveis de processo. Assim, além do balanço de massa, os fatores termodinâmicos são muito expressivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, F. I. C. **Produção de Coque Metalúrgico a Partir de Carvão Densificado por Vibrocompactação em Forno de Soleira Aquecida**. 2017. 77f. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2017.

ASSIS, P. S. **Notas de aulas de MET 130 – Versão I**. Ouro Preto, MG, 2021.

DINIZ, A. P. M. **Modelos de previsão do conteúdo de silício no ferro-gusa usando redes neurais artificiais**. 2018. 173f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Elétrica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2018.

GANDRA, B. F. **Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno**. 2006. 98f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006.

GEERDES, M.; CHAIGNEAU, R.; LINGIARDI, O; MOLENAAR, R.; OPBERGEN, R.; SHA, Y.; WARREN, P. **Modern Blast Furnace Ironmaking**. 4 ed. Amsterdã: IOS Press BV, 2020. 264p.

GEERDES, M.; VLIET, C. V. D.; TOXOPEUS, H. **Modern Blast Furnace Ironmaking**. Cidade de IJmuiden: IOS Pr Inc, 2004. 128p.

GUILHERME, V. S.; CASTRO, J. A. **Utilização de gás de coqueria na sinterização de minério de ferro**. **SciELO Brasil**. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/swRysdVbGPfdnYhc334BqRG/?lang=pt>. Acesso em 19.ago.2021.

HIGUCHI, K. et al. **Quality Improvement of Sintered Ore in Relation to Blast Furnace Operation**. **Nippon steel technical report n° 94**. 2006. Disponível em: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9406.pdf>. Acesso em 15.ago.2021.

LANZA, L. C. **Manual de controle térmico**. Ouro Branco, MG, 2001.

MACHADO, F. S. **Aproveitamento Energético de Finos de Carvão em alto-forno, Visando Redução de Emissões e Obtenção de Créditos de Carbono**. 2009. 135f. Tese. Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

MINITAB, LLC. **Prepare os alunos para o mundo conduzido por dados do futuro**. Disponível em: <https://www.minitab.com/pt-br/>. Acesso em 19.ago.2021.

PATNAIK, P.; DUMPAWAR S. K. **An Attempt at Optimizing the Flow Characteristics of Blast Furnace Slag by Investigation With Slag Obtained from Blast Furnace of Rourkela Steel Plant, Sail**. 2010. 56f. Tese. Department of Metallurgical and Materials Engineering. National Institute of Technology, Rourkela, 2010.

VIEIRA, D. H. **Avaliação de Parâmetros Operacionais que Influenciam a Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. 2012. 123f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

VRAC, M. **Carvão e Coque na Siderurgia**. **Acervo digital PUC-Rio**. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11326/11326_3.PDF. Acesso em 19.ago.2021.