



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

**“ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL TÉRMICO DE UM
ALTO-FORNO À CARVÃO VEGETAL DURANTE O CONTROLE DA
TAXA DE CARBONO DE TOPO”**

Daiana Cristina Pereira da Silva

Ouro Preto, Junho de 2022

Daiana Cristina Pereira da Silva

**“ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL TÉRMICO DE UM ALTO-FORNO
À CARVÃO VEGETAL DURANTE O CONTROLE DA TAXA DE CARBONO DE
TOPO”**

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Coorientador: Msc. Eng. Metalurgista Pericles Guimarães Oliveira Aguiar

Ouro Preto, Junho de 2022.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Daiana Cristina Pereira Da.

Análise do comportamento do nível térmico de um alto-forno à carvão vegetal durante o controle da taxa de carbono de topo. [manuscrito] / Daiana Cristina Pereira Da Silva. - 2022.

53 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Coorientador: Me. Pericles Guimarães Oliveira Aguiar.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Alto-Forno. 2. Carvão Vegetal. 3. Nível Térmico. 4. Carbono - Consumo. I. Aguiar, Pericles Guimarães Oliveira. II. Assis, Paulo Santos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 620.1

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



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Daiana Cristina Pereira da Silva

Análise do comportamento do nível térmico de um alto-forno à carvão vegetal durante o controle da taxa de carbono de topo

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

Aprovada em 27 de junho de 2022

Membros da banca

Dr. Paulo Santos Assis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Jorge Luiz Bréscia Murta - (Universidade Federal de Ouro Preto)
M.Sc. Péricles Guimarães Oliveira Aguiar - (APERAM South America)
Eng. Pablo Henrique Kelly Campos- (ArcelorMittal Brasil)

Paulo Santos Assis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Santos Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/07/2022, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0355882** e o código CRC **F6D4DA92**.

AGRADECIMENTO

A toda minha família e principalmente aos meus pais por todo amor, apoio e por me proporcionar esta oportunidade. À Deus, por tudo que me concedeu em minha vida e por todas as bênçãos.

Ao meu orientador e professor Paulo Assis, por todo apoio, orientação, oportunidades durante toda a graduação e por estar sempre solícito a ajudar.

Aos professores do curso de engenharia metalúrgica por todos os ensinamentos e conhecimentos compartilhados.

À Universidade de Leoben e ao K1-Met GMBH pela oportunidade proporcionada em vivenciar uma nova cultura e desafios na Áustria.

À Aperam South América, em especial ao time do Controle de Processos da Redução e Alto-Forno 2, por toda troca de conhecimentos e oportunidades de desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Pericles Guimarães, por todo conhecimento e oportunidade de aprendizagem que me proporcionou durante minha jornada na Aperam.

Aos meus companheiros de curso e aos amigos da universidade: Ludimila, Michele, Filipe, 193, Leo, Eltin, Larissa e Pablo.

Ao Saulo, pelo companheirismo, apoio e incentivo nessa etapa final.

À vida republicana de Ouro Preto, em especial, as repúblicas Vizinhas e Sinta Liga, que tem todo meu coração.

“O importante é não parar de questionar”.
Albert Einstein

RESUMO

A produção do ferro gusa por meio do alto-forno demanda de um alto consumo de combustível redutor (carvão vegetal ou coque) para a redução da carga metálica e produção do produto final (gusa). O presente trabalho visa promover o entendimento do processo produtivo do ferro gusa, dando foco à operação de um alto-forno que utiliza como combustível o carvão vegetal. Diante do fato de que para ter uma melhor eficiência na operação do alto-forno, o mesmo deve operar com um bom controle do nível térmico, visto que isso implica em um produto final com melhor qualidade e também na redução do custo da produção. Um alto-forno com o nível térmico estável e controlado, resulta na redução do consumo de combustível/redutor (carvão vegetal ou coque) pelo mesmo. Para o controle do nível térmico, foi realizado um teste onde a taxa de carbono de topo foi monitorada, obtendo uma estabilidade e redução do nível térmico, bem como no silício incorporado ao gusa.

Palavras-chave: Alto-Forno. Consumo de carbono. Nível térmico. Carvão Vegetal.

ABSTRACT

The production of molten iron through the blast furnace requires a high consumption of reducing fuel (charcoal or coke) for the reduction of the metallic load and production of the final product (molten iron). The present work aims to promote the understanding of the molten iron production process, focusing on the operation of a blast furnace that uses charcoal as fuel. Given the fact that in order to have a better efficiency in the operation of the blast furnace, it must work with a good control of the thermal level, since this implies in a final product with better quality and also in the reduction of production costs. A blast furnace with a stable and controlled thermal level results in a reduction in the consumption of fuel (charcoal or coke) by the blast furnace. For the control of the thermal level, a test was carried out where the rate of top carbon was monitored, obtaining a stability and reduction of the thermal level, as well as in the silicon incorporated into the molten iron.

Keywords: Blast Furnace. Carbon consumption. Thermal Control. Charcoal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Fluxograma de funcionamento do alto-forno e seus principais equipamentos	15
Figura 3.2	Esquema das zonas internas de um alto-forno e suas reações	16
Figura 3.3	Sistema de carregamento por duplo cone	18
Figura 3.4	Esquema do sistema de injeção de finos pela ventaneira	20
Figura 5.1	Carbono de topo por dia	30
Figura 5.2	Taxa de carbono de injeção por dia	31
Figura 5.3	ANOVA para o Carbono Total	31
Figura 5.4	Umidade do carvão enornado	32
Figura 5.5	Carta I-AM da temperatura de vazamento do ferro gusa	34
Figura 5.6	Carta I-AM para os dados de temperatura de vazamento do ferro-gusa	35
Figura 5.7	Teste de desvio para temperatura do ferro gusa	35
Figura 5.8	Carta I-AM do teor de silício contido no ferro gusa	36
Figura 5.9	ANOVA do teor de Si do ferro gusa	37
Figura 5.10	Teste dos desvios padrão para o teor de Si	37
Figura 5.11	Resultados para o Mn e O do ferro gusa	38
Figura 5.12	ANOVA e teste de desvio padrão para o P	39
Figura 5.13	ANOVA e teste de desvio padrão para o Mn	39
Figura 5.14	Composição química da escória e consumo do leito	40
Figura 5.15	Resultados das médias para as análises de CaO e SiO ₂ da escória	41
Figura 5.16	Carta I-AM para basicidade binária	42
Figura 5.17	ANOVA para a basicidade	42
Figura 5.18	Teste dos desvios para a basicidade	43
Figura 5.19	Permeabilidade do leito do forno	44
Figura 5.20	ANOVA para a permeabilidade	44
Figura 5.21	Teste dos desvios para a permeabilidade	45
Figura 5.22	Regressão para temperatura do gusa e silício	46
Figura 5.23	Regressão múltipla para o carbono total	47
Figura 5.24	Gráfico de produção do gusa por dia	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Produção de ferro gusa no Brasil (milhões de toneladas)	12
Tabela 3.2	Características dos combustíveis redutores	19
Tabela 4.1	Dados de projeto do Alto-Forno 2	27
Tabela 5.1	Resultados dos indicadores de nível térmico	33

LISTA DE SIGLAS

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração

GAF – Gás de Alto-Forno

IaBr - Instituto Aço Brasil

ICP – Injeção de Carvão Pulverizado

GCO – Gás de Coqueria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivo Específico	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Alto-Forno	16
3.2 Combustíveis Redutores de um Alto-Forno	18
3.3 Principais Áreas que Constituem o Alto-Forno	19
3.3.1 Transporte e carregamento de matérias-primas	19
3.3.2 Limpeza dos gases	20
3.3.3 Refrigeração do alto-forno	21
3.3.4 Injeção auxiliar	21
3.3.5 Casa de corrida	22
3.3.6 Regeneradores de calor	23
3.4 Controle do Nível Térmico do Forno	24
4 METODOLOGIA	27
4.1 Dados do Reator	27
4.2 Descrição do Teste	28
4.3 Definição dos Indicadores de Análises	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Indicadores de Desempenho de Controle do Nível Térmico	33
5.1.1 Temperatura de vazamento do gusa	33
5.1.2 Análise do silício, manganês e fosforo	36
5.1.3 Análise da basicidade binária, sílica e oxido de cálcio	39
5.1.4 Permeabilidade	43
5.1.5 Análise de regressão	45
5.1.6 Impacto na produção diária	47
6 CONCLUSÃO	49
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

O setor siderúrgico brasileiro exerce um forte papel na economia brasileira, sendo classificado como o 12º país exportador de produtos siderúrgicos, segundo dados do Instituto Aço Brasil (IaBr, 2021). Diante ao fato da crescente competitividade do setor no âmbito do mercado mundial, as empresas aliam a produção ao aprimoramento e desenvolvimento de melhorias nos processos e produtos, objetivando a redução de custo dos mesmos.

A produção de ferro gusa por meio do alto-forno, o qual é um reator metalúrgico de extrema complexidade, baseia-se em realizar a redução da carga metálica (minérios, pelotas, fundentes) e combustível redutor (coque ou carvão vegetal), para a obtenção do ferro gusa e posterior produção do aço (MOURÃO *et al*, 2007).

O processo produtivo no interior do alto-forno constitui um leito poroso obtido dos componentes granulados da carga metálica e carga redutora. O ar ou gás combustível quente, ascende pelo interior do reator, passando através dos poros da carga, promovendo a energia térmica necessária para que ocorra as reações químicas de redução dos óxidos de ferro, para que seja formado o ferro gusa. O carbono é o responsável por atuar como meio poroso em todo o leito do alto-forno, ele se encontra presente nos grãos da carga redutora (combustível), coque ou carvão vegetal (SAMPAIO, 2008)

Com uso através do carvão vegetal e do coque, o carbono é o principal insumo utilizado para reduzir os óxidos de ferro no interior do alto-forno e sua utilização representa uma porcentagem consideravelmente alta no custo do gusa (CALDERON *et al*, 2016).

Com base no ano de 2020 e conforme os dados do Anuário Estatístico da Sindifer apresentados na tabela 1.1, a qual apresenta a produção de ferro gusa em milhões de toneladas, cerca de 75,4% da produção se deu com o uso do coque como combustível e apenas 24,6% com o uso do carvão vegetal. O estado de Minas Gerais é o maior produtor de ferro gusa em altos-fornos à carvão vegetal no país, seguido do Maranhão, Pará e Espírito Santo (SINDIFER, 2021).

Tabela 1.1 – Produção de ferro gusa no Brasil (milhões de toneladas)

Ano Base	Coque	Carvão Vegetal		TOTAL
		Usinas	Produtores	
		Integradas	independentes	
2016	23,88	2,15	3,55	29,58
2017	25,89	2,44	3,82	32,15
2018	26,20	2,45	4,11	32,76
2019	23,95	2,33	4,62	30,90
2020	22,27	2,25	5,02	29,54

Fonte: SINDIFER (2021)

Em uma matriz de custo da produção do ferro gusa em alto-forno à carvão vegetal, cerca de 55% do custo do metal é representado pelo o uso desse combustível, de acordo com os dados da SINDIFER, 2008. Com isso, ao longo dos anos as indústrias trabalham para que o consumo do mesmo possa ser reduzido e controlado. Uma das principais metas é manter o consumo de carbono em níveis ótimos, satisfazendo as restrições termodinâmicas e assegurando a energia necessária para as reações de redução (ASSIS, 2014).

O alto-forno possui um processo complexo, e a estabilidade deste pode sofrer interferências devido as variações de condições operacionais e qualidade das matérias-primas. Ao controlar o processo, o custo do produto final pode ser reduzido (GASPARINI, 2016).

Uma das principais formas para se ter um processo produtivo do ferro gusa estável, é realizar o controle do nível térmico do mesmo, mantendo-o dentro de uma faixa com limites fixados. Como indicadores de um bom controle de nível térmico do forno, são utilizados a temperatura do gusa e a porcentagem de silício (Si) do mesmo (GASPARINI, 2016).

Neste contexto, visando realizar o entendimento do processo produtivo de ferro gusa através de um alto-forno à carvão vegetal, aliado com a necessidade em verificar a capacidade de se obter melhorias no controle de processos da produção, esta monografia irá avaliar o comportamento do nível térmico do alto-forno e dos indicadores de controle durante a realização de um teste que tem como principal premissa controlar a taxa de carbono de topo e obter a estabilidade térmica do forno.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar os efeitos dos indicadores de nível térmico do alto-forno ao realizar o controle do consumo de carvão vegetal, através do consumo do carbono de topo do Alto-Forno 2 da Siderúrgica X.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o teste de controle de consumo de carbono de topo no alto-forno a fim de buscar a estabilidade do nível térmico do forno;
- Obter os resultados dos indicadores de nível térmico no período anterior, posterior e durante a realização do teste;
- Analisar e discutir possíveis variações nos indicadores de controle do nível térmico durante a realização do teste.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alto-Forno

Um reator metalúrgico de extrema complexidade, o alto-forno é o equipamento utilizado para a produção do ferro gusa, a partir da redução do minério de ferro e fundentes, utilizando-se de um combustível que pode ser o coque ou carvão vegetal (MOURÃO *et al*, 2007). A definição de qual tipo de combustível utilizar no processo, varia de acordo com a capacidade produtiva do alto-forno, sendo o carvão vegetal normalmente utilizado para uma produção diária de até 1.200 toneladas de gusa, e o coque para altos-fornos com capacidade produtiva mais elevadas, cerca de 3.500 a 12.000 toneladas de gusa por dia (RIZZO, 2009).

O alto-forno é um reator que opera produzindo verticalmente e em regime de contracorrente, sendo que, toda a carga a ser reduzida entra pelo topo e os gases redutores são injetados na base do mesmo, fazendo o caminho ascendente até o topo, em regime permanente. A produção do ferro gusa ocorre continuamente, ou seja, o alto-forno não deve ter sua operação paralisada, a menos que seja para manutenções preventivas e programadas em equipamentos essenciais para o bom funcionamento e segurança do processo produtivo (MOURÃO *et al*, 2007).

A Figura 3.1, apresenta o fluxograma típico de um alto-forno bem como os principais equipamentos que constituem o mesmo. A planta típica de um alto-forno é constituída basicamente pelos seguintes equipamentos (RIZZO, 2009):

- Regeneradores de calor (sendo estes de 3 a 4);
- Sistema de limpeza de gás;
- Gasômetro;
- Equipamentos para estocagem e pesagem das matérias-primas;
- Equipamentos para realizar o transporte e carregamento das matérias-primas no topo do alto-forno;
- O forno.

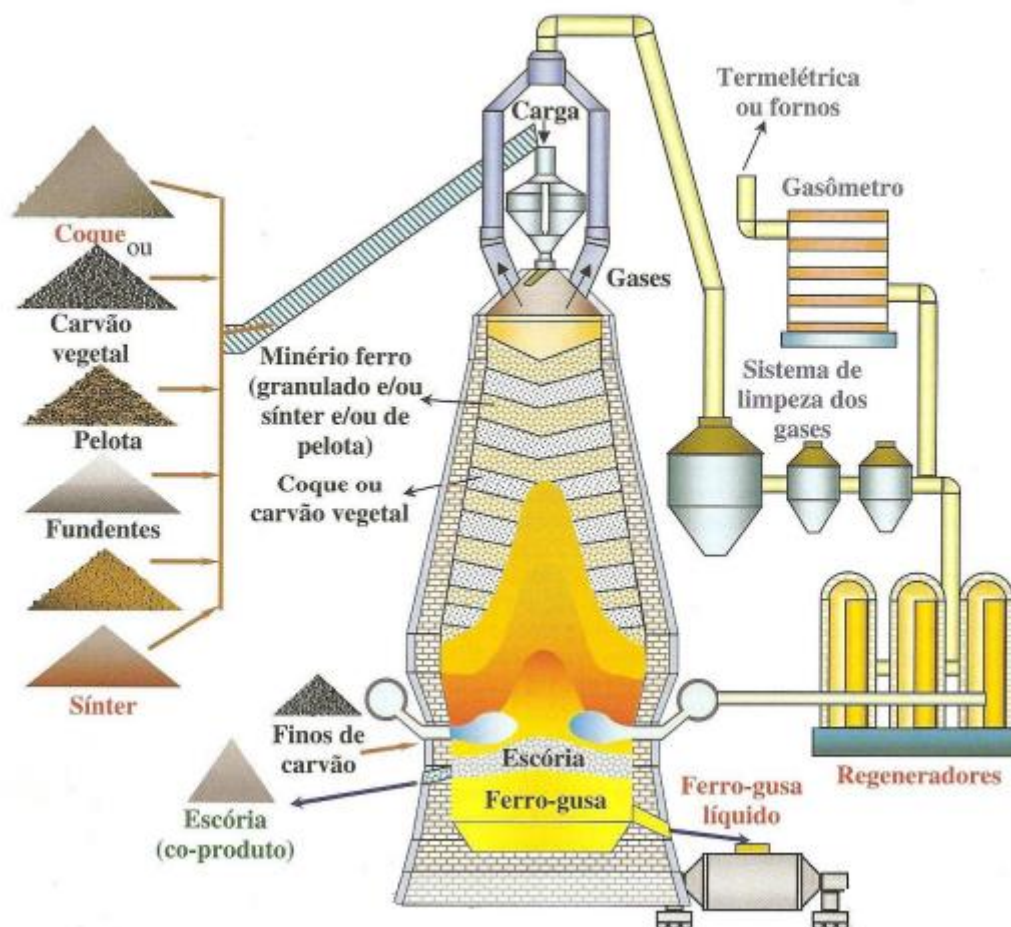


Figura 3.1: Fluxograma de funcionamento do alto-forno e seus principais equipamentos (RIZZO, 2009).

As matérias-primas sólidas; minério de ferro (pelotas, sinter), fundentes (manganês, calcários, dolomitas e/ou outros) e o combustível redutor (coque ou carvão vegetal); entram pelo topo do alto-forno em temperatura ambiente por meio de correias transportadoras. A ar aquecido pelos regeneradores é soprado em elevada temperatura, de até 1300°C, pelas ventaneiras que ficam localizadas na base do alto-forno, enriquecido ou não com oxigênio, e seguem o caminho ascendente. O combustível (coque ou carvão vegetal) em contato com o oxigênio do ar aquecido sofre a combustão (queima), que promoverá a geração de gases redutores em alta temperatura, os quais transformam e reduzem as matérias-primas (RIZZO, 2009).

Durante o processo de redução das matérias primas em gusa, muitas reações químicas ocorrem no interior do alto-forno, sendo que o objetivo principal é o de promover a redução progressiva dos óxidos de ferro da carga, para então se obter o ferro metálico. O ferro metálico é então fundido, assim como a escória produzida, pela energia gerada pelas reações de combustão e redução, e estas matérias em seu estado líquido, são escoados e depositados no interior do cadinho (VIEIRA, 2012)

A Figura 3.2 apresenta como é dividido internamente as zonas do alto-forno e as reações químicas que ocorrem em cada uma delas.

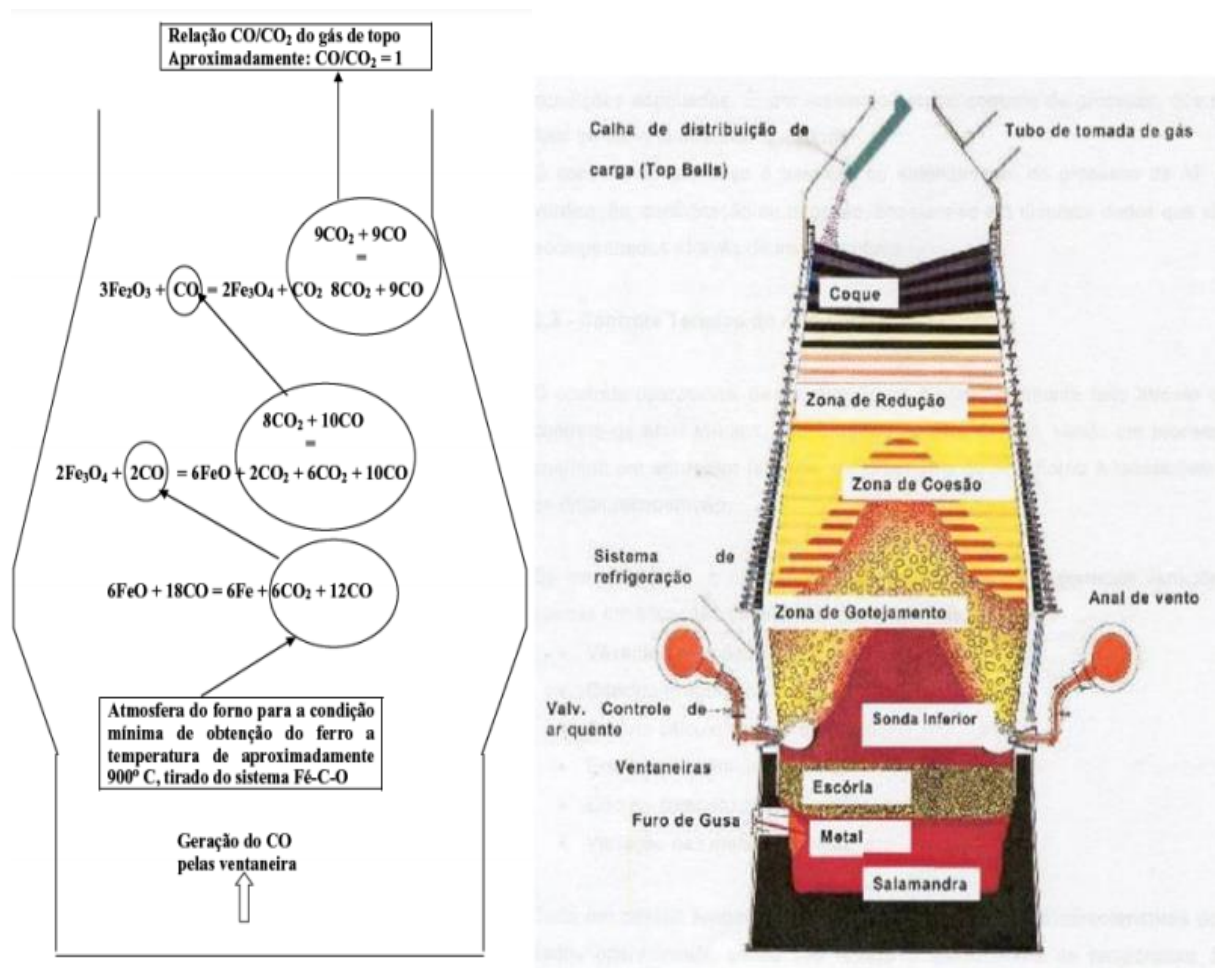


Figura 3.2: Esquema das zonas internas de um alto-forno e suas reações (MOURÃO *et al*, 2007).

3.2 Combustíveis Redutores de um Alto-Forno

Os principais responsáveis por transformar o carbono (C) em monóxido de carbono (CO) e reduzir o óxido de ferro (Fe₂O₃) em ferro (Fe), são os combustíveis redutores, que pode ser o carvão vegetal e/ou coque utilizados no alto-forno. Devido as diferenças existentes no processo de obtenção desses dois redutores, os mesmos apresentam características químicas, físicas e metalúrgicas distintas, conforme apresenta a tabela 3.2 (RIZZO, 2009).

Tabela 3.2 - Características dos combustíveis redutores

Propriedades	Unidades	Carvão Vegetal	Preferência de Carvão Vegetal	Coque	Preferência do Coque
Teor de Umidade	%	8-20	<7	1-3	1-6
Carbono Fixo	%	70-80	75-80	88-92	85-88
Densidade	kg m ⁻³	180-350	>250	400-550	-
Material Volátil	%	25-35	max 25	7.8-11	1-3
Cinza	%	1-1.5	<1	9-12	0.1-0.5
Enxofre	%	0.03-0.1	Max 0.03	0.45-0.7	-
Tamanho	mm	9-100	40-50 uniforme	25-80	-
Resistência à Compressão	kg cm ⁻²	10-80	50-100	130-160	100-200
CRI (Coke Reaction Index)	%	8 x maior do que do coque	-	25	-
CSR (Coke Strength After Reaction)	%	57	-	65	-

Fonte: Adaptado de Isbaex (2018)

O redutor (coque e /ou carvão vegetal) também atua como fonte de energia térmica para o processo produtivo, além de fornecer uma estrutura de sustentação à carga e promover a permeabilidade do leito, visto que o mesmo ocupa aproximadamente 80% do volume da carga total do reator (FALEIRO, 2013).

Devido ao fato da resistência mecânica do carvão vegetal (10-80kgf/cm²) ser inferior à do coque (130-160kgf/cm²), o uso de carvão vegetal é dificultado em altos-fornos de grande porte (RIZZO, 2009). Estima-se que os maiores altos-fornos do mundo a carvão vegetal produzem cerca de 1.200t gusa/dia e os altos-fornos a coque chegam a produzir mais de 10.000t gusa/dia (FALEIRO, 2013).

3.3 Principais Áreas que Constituem o Alto-Forno

3.3.1 Transporte e carregamento de matérias-primas

Como visto anteriormente, para a produção do ferro gusa o alto-forno deve ser alimentado pelas matérias-primas; os minérios, fundentes, pelota e combustível (coque ou carvão vegetal); pelo topo do forno e carvão pulverizado e gás natural por meio das ventaneiras, que ficam localizadas na parte inferior do mesmo (MOURÃO *et al*, 2007).

As matérias-primas que são carregadas pelo topo, em grande parte das siderúrgicas, são armazenadas em silos que ficam localizados na *stock house*, de onde são transportadas até o

alto-forno por meio de correia transportadora ou *skips* (sistema de carrinho). Os silos, além de armazenarem a matéria-prima, eles também controlam a granulometria, quantidade e também a umidade dos mesmos, para que a carga entregue ao forno esteja uniforme e adequada para o processo produtivo (RIZZO, 2009)

Conforme Mourão *et al* (2007), no interior do topo do alto-forno, os materiais podem ser carregados por um sistema conhecido como duplo cone, conforme apresenta a Figura 3.3, que possuem o objetivo de realizar a distribuição da carga de maneira circunferência na “goela” do forno e também de zelar os gases.

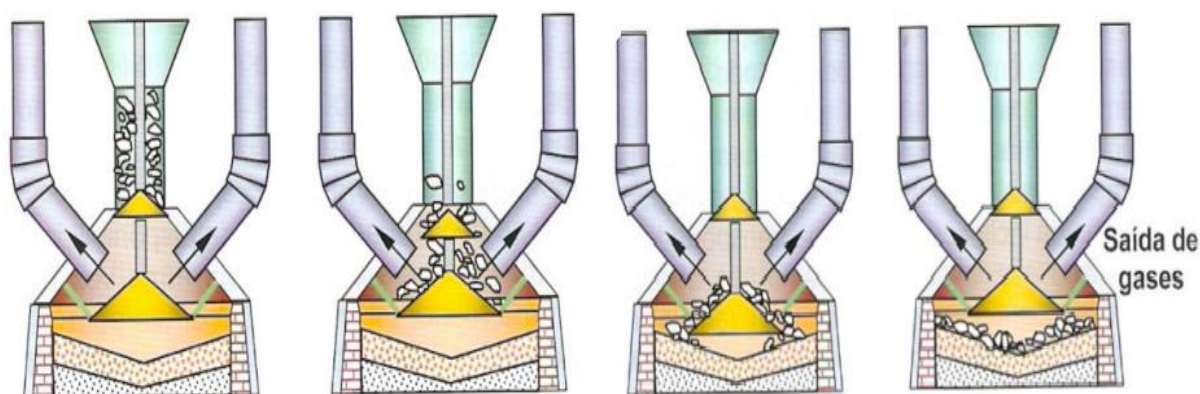


Figura 3.3: Sistema de carregamento por duplo cone (RIZZO, 2009).

Um outro sistema de carregamento também é conhecido por sua aplicabilidade nos fornos mais modernos, o por calha rotativa, o qual se baseia em duas tremonhas que realizam a deposição do material em uma calha rotativa, podendo realizar a alteração do ângulo desta, o que permite melhor direcionamento da carga para o interior do alto-forno (RIZZO, 2009).

3.3.2 Limpeza dos gases

O gás de alto-forno, GAF, gerado durante o processo de produção do ferro gusa, é acumulado e tem sua saída pelo topo do forno, com temperatura de cerca de 150°C (RIZZO, 2009). Esse gás é reutilizado no processo produtivo, pois é enviado para realizar o aquecimento dos regeneradores de calor, contudo, o mesmo possui partículas de pó, sendo então necessário realizar sua limpeza para minimizar as mesmas (BELO, 2019).

Ao deixar o topo do forno, o GAF passa primeiramente por um coletor de pó, onde será depositado as partículas mais grossas. Deixando o coletor de pó, ele passa pelo lavador Venturi, o qual promove jatos de água para realizar a limpeza do mesmo, seguindo após sua segunda

lavagem para o desumidificador. Feito todo o processo de limpeza, o gás é enviado, parte para os regeneradores de calor e parte para armazenamento no gasômetro (MOURÃO *et al*, 2007).

3.3.3 Refrigeração do alto-forno

A refrigeração de um alto-forno nada mais é que um sistema utilizado para refrigerar a carcaça deste, pois segundo Mourão *et al* (2007), as paredes do forno são submetidas continuamente por intensa carga térmica que promovem o desgaste das mesmas. Essa carga é resultante do fluxo do material sólido, líquido e gases em elevadas temperaturas.

O sistema de refrigeração é então utilizado para minimizar a intensidade desse desgaste e aumentar a vida útil das paredes, pois eles extraem para a água utilizada no processo parte do calor que é absorvido pelas paredes, reduzindo a temperatura destas (MOURÃO *et al*, 2007)

São dois os sistemas de refrigeração de carcaças utilizados, o por placas de cobre e o *Stave Cooler*. O sistema por placas é mais antigo, se baseia na utilização de placas de cobre, com vazios internos, entre os tijolos refratários do forno e a água que percorre os vazios extrai o calor da parede. A refrigeração por *staves* é considerada mais uniforme, pois são peças fundidas de cobre, aço ou ferro com tubulações internas para a circulação de água, instaladas entre a carcaça e a parede refratária do forno (RIZZO, 2009).

3.3.4 Injeção auxiliar

Como uma maneira auxiliar de elevar a produtividade do forno e reduzir o consumo de combustível, é empregado a injeção de materiais combustíveis através das ventaneiras, assim como é possível realizar o enriquecimento do ar, proveniente dos regeneradores, com o oxigênio (VIEIRA, 2012).

Como forma de atuar como combustível/redutor, a injeção de finos de carvão pelas ventaneiras é utilizada para reduzir o consumo de carbono de topo, sendo essa técnica conhecida como ICP (Injeção de Carvão Pulverizado). De acordo com Rizzo (2009), os finos injetados através das ventaneiras tem como principal objetivo atuar como combustível e fonte de gases redutores, além de possibilitar uma maior flexibilidade operacional do alto-forno.

A injeção ocorre pelas ventaneiras, através das lanças de injeção, na mesma tubulação onde ocorre a injeção do ar quente soprado pelos regeneradores. O carvão então, em sua zona de combustão, será desvolatilizado e queimado, promovendo o calor que irá aquecer a carga metálica e gases, os quais irão atuar na redução da carga (RIZZO, 2009) A Figura 3.4, apresenta o esquema do sistema de injeção de finos pela ventaneira.



Figura 3.4: Esquema do sistema de injeção de finos pela ventaneira (ASSIS, 2014)

3.3.5 Casa de corrida

A casa de corrida é local por onde se tem o esgotamento dos produtos finais da produção do alto-forno, o ferro gusa e a escória, ambos no estado líquido. A remoção desses deve ocorrer de forma que não ocorra o acúmulo em excesso do metal no interior do cadinho e que se obtenha uma boa separação dos dois produtos.

Com a realização de furos de gusa, os dois materiais são escoados para fora no forno, ocorrendo a separação dos mesmos por diferença de densidade, visto que a densidade da escória é menor, ($2,4\text{t/m}^3$) que do ferro gusa, que é de $7,2\text{t/m}^3$ (BELO, 2019). A escória é direcionada para o sistema de granulação por meio do canal de escória e o ferro gusa líquido para o carro torpedo, através do canal secundário, de onde será encaminhado para a aciaria (MOURÃO *et al*, 2007).

A abertura dos furos de gusa é realizada com o uso de máquinas de perfuração (perfuratriz hidráulica ou pneumática) e brocas, as quais devem possuir um bom desempenho e rigidez para que o furo seja realizado com precisão. Após a drenagem do ferro gusa e da escória, o furo deve ser fechado (tamponado) pelo canhão de lama, o qual promove, em uma pressão superior a pressão interna do forno, a injeção de uma massa refratária no furo de gusa (RIZZO, 2009).

3.3.6 Regeneradores de Calor

Segundo Rizzo (2009), um dos principais fundamentos para o funcionamento do alto-forno, é a necessidade da combinação do oxigênio do ar que é injetado pelas ventaneiras com o carbono presente no combustível/redutor, para que ocorra a reação de combustão. Essa reação irá gerar o calor que é utilizado para o aquecimento da carga metálica, bem como o gás redutor, importante para a redução do minério de ferro em ferro metálico.

O ar injetado pelas ventaneiras conforme citado, é proveniente dos regeneradores de calor (trocador de calor), o qual tem como função realizar o aquecimento do ar frio, que pode ser enriquecido ou não com oxigênio, para sua injeção no alto-forno, contribuindo para a redução do consumo de combustível no mesmo. Nesse processo, pode ser utilizado o ar coletado da atmosfera, parte do gás do alto-forno (GAF) e/ou gás de coqueria (GCO) (MOURÃO *et al*, 2007).

São dois os tipos de regeneradores de calor mais utilizados pelas indústrias, o primeiro sendo denominado como *glendons* e o segundo, *cowpers*. Os *glendons* são mais utilizados para os altos-fornos menores e à carvão vegetal, visto que são menos eficientes, obtendo uma temperatura de sopro máxima de 850°C e pressão de sopro menor, cerca de 2.0kgf/cm². Já os *cowpers* são capazes de elevar a temperatura do ar em até 1350°C, por esse motivo, ele possui um custo mais elevado se comparado com os *glendons*, e é utilizado em alto-forno maiores (RIZZO, 2009).

Um terceiro tipo de regenerador vem sendo utilizado, principalmente em países como Estados Unidos, Rússia e Japão, fabricado pela *Kalugin*, o qual deu o mesmo nome para o regenerador. Como sua principal diferença, ele conta com uma pré-câmara de combustão e pode obter um aquecimento do ar mais eficiente, elevando a temperatura do mesmo acima de 1300°C (KALUGIN, 2012).

3.4 Controle do Nível Térmico do Forno

Para se ter uma produção do ferro gusa estável, eficiente, com baixo consumo de redutor e alta produtividade, se faz necessário obter os dados dos parâmetros de controle por meio dos equipamentos de medições e/ou modelos estatísticos e matemáticos. Isso se torna necessário para garantir as condições ótimas do controle térmico, da permeabilidade e o esgotamento do cadinho (FALEIRO, 2013).

No caso de um processo normal, o controle térmico constante do processo é necessário pois uma série de fatores (principalmente relacionadas a mudanças nas propriedades da matéria-prima) afetam o estado térmico do forno. Se não forem controladas, essas mudanças térmicas podem ter consequências graves, como desvios na qualidade do ferro gusa, perdas de produção e até resfriamento do cadinho. Alguns dos principais fatores que podem afetar o nível térmico são (FALEIRO, 2013):

- Fatores relativos ao carregamento;
- Fatores relativos ao sopro;
- Fatores diversos (entrada de água, etc.)

O controle da taxa de carbono de topo e de injeção praticada na operação de um alto-forno é utilizado quando se existe a necessidade de ajuste e/ou controle do nível térmico, sendo que a taxa de injeção de finos (ICP) facilita mais rapidamente o controle térmico. A retirada ou adição de carbono via combustível (carvão vegetal ou coque) promove o controle térmico, assim como também ajustes na temperatura de sopro e oxigênio. Entretanto, aumentos excessivos nas taxas de carbono podem prejudicar a permeabilidade do leito do forno e vir a causar a baixa produtividade do alto-forno (VIEIRA, 2012).

Um dos parâmetros aplicados para medir o nível térmico é a temperatura do gusa, que para os altos-fornos a carvão vegetal a mesma deve ser maior que 1360°C, mas outros aspectos podem ser avaliados, como os resultados de análises químicas do gusa e da escória. Considerando analisar quimicamente o ferro gusa, o silício (Si) e o enxofre (S) são excelentes indicadores térmicos e deve-se atentar para o efeito das matérias-primas nesses níveis. Outro parâmetro que deve ser levado em consideração é a basicidade binária, visto que a mesma influi nos teores de Si do ferro gusa (FALEIRO, 2013).

Ao se ter uma queda do nível térmico do forno, a porcentagem de silício no gusa diminui e a de enxofre aumenta, devido as reações de dessulfuração e incorporação de silício no gusa serem endotérmicas. Porém, quando se tem o aumento do nível térmico, consequentemente a porcentagem de Si no gusa aumentará e a sílica presente na escória cairá, resultando dessa maneira o aumento da basicidade binária. O teor de manganês (Mn) também pode ser observado, visto que com o aumento do nível térmico, maior será o teor de Mn no ferro gusa, pois se tem o aumento da redução do óxido de manganês (MnO). O mesmo conceito pode ser seguido para o teor de fósforo (P) no gusa (GASPARINI, 2016).

O nível térmico do alto-forno deve ser mantido sob controle, porém, em situações adversas, se faz necessário, como por exemplo, realizar ajustes na vazão de sopro e da temperatura de chama para controlar o corrigir o mesmo (FALEIRO, 2013). Outras ações também podem ser adotadas para manter o controle do nível térmico do forno (GASPARINI, 2016):

- Controlar a taxa de injeção do combustível auxiliar;
- Ajuste na relação das matérias-primas (carvão vegetal/minérios);
- Vazão de ar de sopro e sua umidade;
- Temperatura do sopro.

Os resultados dos valores desses parâmetros devem ser avaliados tanto anteriormente quando posteriormente à eventos que levam a perda do nível térmico do alto-forno, pois eles servem de base para analisar o estado térmico dele, e suas oscilações podem provocar atrasos na tomada de decisões corretivas. Outros parâmetros também podem ser utilizados, sendo eles (GASPARINI, 2016):

- Temperatura do gás de topo;
- Drenagem do cadinho;
- Rendimento do gás;
- Pressão da base, do topo e do ar;
- Avaliação visual do gusa, escória e ventaneiras;
- Comportamento da descida de carga;
- Composição e carregamento da carga enforada.

Para a produção do ferro gusa através do alto-forno, o controle térmico do processo produtivo é de extrema importância conforme já mencionado, pois ao manter estabilidade e melhora do nível térmico, o produto final (gusa) terá uma qualidade melhor, além de se obter mais

eficiência no processo de redução da carga (metálica e redutora) e consequentemente redução no consumo de energia (carga redutora) (GASPARINI, 2016). Entretanto, com as variações existentes na qualidade das matérias-primas e de processo no alto-forno a carvão vegetal, não existe um modelo estatístico que possa ser aplicado (FALEIRO, 2013).

Para os altos-fornos a coque, o modelo estatístico utiliza da “Fórmula de Flint” para relacionar o consumo específico de coque com algumas variáveis do processo de produção do gusa. De acordo com Faleiro, 2013, no ano de 1990, Mapa *et al.*, tentaram prever um modelo para alto-forno a carvão vegetal a partir da “Fórmula de Flint”, mas a correlação entre as variáveis de processo com o consumo específico de carbono não foi possível. A impossibilidade de prever esse modelo se deu devido aos conhecimentos precários, naquela época, sobre modelos estatísticos, além da baixa confiabilidade dos parâmetros operacionais e estabilidade do processo.

Nos dias atuais, já existem estudos sobre a aplicação de redes neurais para modelamento de controle de processos de um alto-forno, e esse modelo surge como uma alternativa viável, já que a sua utilização se adequa ao banco de dados da operação (CARVALHO, 2019). Carvalho, 2019, desenvolveu um modelo constituído de nove redes neurais que trabalhavam em paralelo, com um total de vinte e três variáveis de entrada, com o objetivo de prever o teor de enxofre e silício no gusa, bem como o consumo total do redutor.

4. METODOLOGIA

Primeiramente, cabe ressaltar que por questões éticas, o nome da siderúrgica (Empresa X) que forneceu os dados e em que foi realizado o teste para o desenvolvimento dessa pesquisa, é mantido em anonimato, sendo as informações e eventos aqui descritos fidedignos ao ocorrido. Para o desenvolvimento do estudo, foi realizado o “Teste” de controle do nível térmico no período de 27/01/2022 à 01/02/2022, onde o principal objetivo foi o de reduzir a variação térmica do forno e manter as variações de carbono de topo estável, dentro de um limite pré-estabelecido. Para a análise dos indicadores, foi tomado o período de 01/01/2022 à 28/02/2022, para que possa ser analisado e comparado, possíveis variações durante o teste.

Os dados foram obtidos utilizando-se o *software* PIMS e seu banco de dados interno, ambos fazem parte da rotina diária do uso da empresa. Para o tratamento dos mesmos, foram utilizados o Excel e *Minitab* 2018 como ferramentas estatísticas, com posterior análise e discussão comparativa. Para as discussões dos resultados, através dos *Minitab* foram realizadas as Cartas I-AM, análise de variância (ANOVA) com um fator, teste de desvio padrão e regressão.

4.1 Dados do Alto-Forno

O teste foi realizado na siderúrgica no período acima citado, apenas no alto-forno 2 da mesma. Os dados de projeto do reator são apresentados na tabela 4.1:

Tabela 4.1: Dados de projeto do Alto-Forno 2

Alto-Forno 2	
Volume Total (m ³)	692
Volume Útil (m ³)	558
Área do Cadinho (m ²)	Sola: 33,18 Lateral: 85,36
Volume Cadinho (m ³)	138.7
Altura do Cadinho (m)	4.18
Número de Ventaneiras	16
Diâmetro das Ventaneiras (mm)	114
Combustível	Carvão Vegetal
Sistema de Distribuição de Carga	Paul Wurth
Regeneradores	3 Cowpers

4.2 Descrição do Teste

A proposta principal do teste foi de reduzir a variação térmica do alto-forno, e para isso, o mesmo se baseou em objetivar a taxa de carregamento de carbono de topo do forno, onde limites mínimo e máximo foram estabelecidos para que o operador pudesse trabalhar dentro dessa faixa. Esses limites foram definidos para se trabalhar com menor variabilidade nas taxas de carbono de topo, adequar ao orçamento; visto que o impacto no custo é maior que a injeção de finos; bem como obter uma melhor estabilidade no processo produtivo.

Os limites de carbono de topo que os operadores deveriam praticar nas cargas do alto-forno foram fixados em:

- Mínimo: 340kg/t
- Máximo: 355kg/t

Mesmo com os limites pré-definidos, cabe ressaltar que o operador poderia alterar o seu consumo de carbono de topo conforme a necessidade do alto-forno. Para a realização do teste, foi definida uma condição para a alteração da taxa de carbono de topo:

- Reduzir ou aumentar 5kg/t de carbono de topo a cada 6 ou 9 cargas.

Em caso de risco operacional ou variações bruscas no processo, o teste poderia ser interrompido.

4.3 Definição dos Indicadores de Análises

Para realizar o desenvolvimento do resultado do teste, foram definidos alguns indicadores principais para a pesquisa, seguindo os autores conforme apresenta a revisão bibliográfica, sendo eles:

- Temperatura de vazamento do ferro gusa (°C);
- Teor de silício (Si), manganês (Mn) e fósforo (P) do ferro gusa (%);
- Basicidade Binária da escória (B2);
- Sílica (SiO₂) e óxido de cálcio (CaO) da escória (%).

Além destes, a permeabilidade e o carbono total foram avaliados durante a pesquisa.

A base de dados dos indicadores, consta do período de 01/01/2022 à 28/02/2022, sendo que o período que antecede o teste definido como “Antes” e o que sucede o teste como “Depois”:

1. Período 1 - Anterior ao teste (Antes): 21/01/2022 à 26/01/2022
2. Período 2 – Teste: 27/01/2022 à 01/02/2022
3. Período 3 – Posterior ao teste (Depois): 02/02/2022 à 07/02/2022

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O controle da taxa de carga do carbono de topo (carvão vegetal) do alto-forno, apresentou uma oscilação menor que as dos períodos que antecede e procede ao teste realizado. A Figura 5.1 mostra o gráfico da taxa de carbono de topo por dia, e nela é possível perceber pequenas variações das barras no período de análise (27/01/2022 à 01/02/2022).

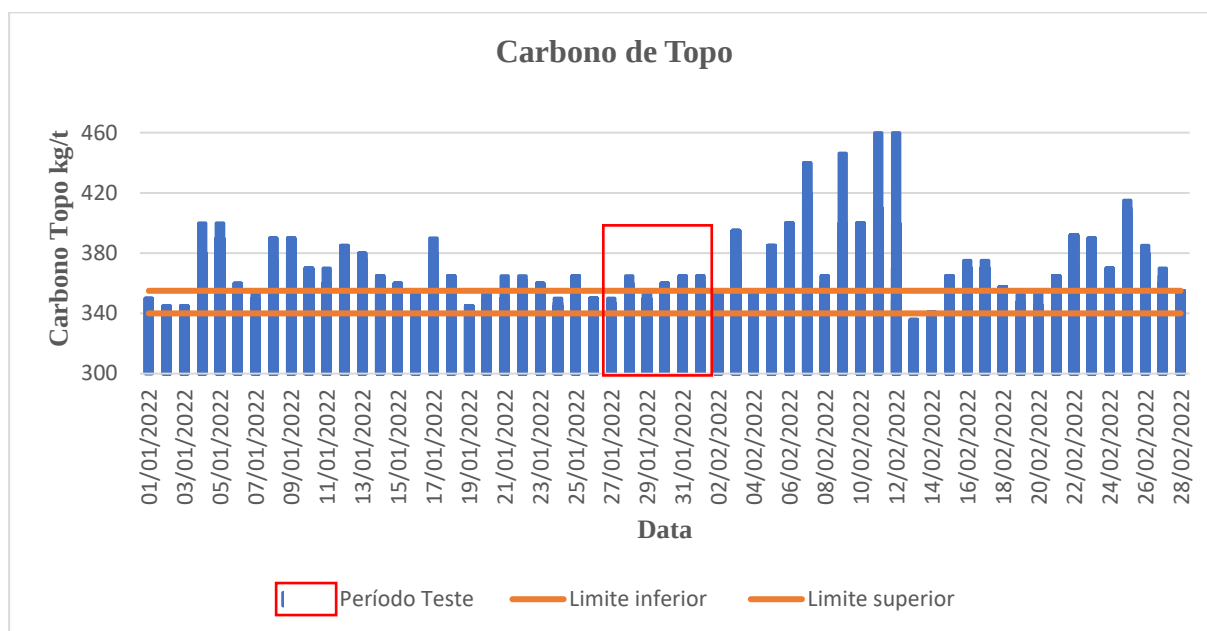


Figura 5.1 – Carbono de topo por dia

Cabe ressaltar, que a operação de um alto-forno se dá com o controle de muitos parâmetros operacionais, e que estes podem ser afetados por fatores externos e de produção, conforme citato no tópico 3.4. Diante disso, seguir as taxas de carbono de topo e de injeção dentro dos limites (inferior e superior), requer um processo completamente estável, e eventos adversos, além do conhecimento do operador do forno, influenciam no bom controle da carga redutora.

A oscilação do nível térmico do forno é o principal fator que influencia nas variações da taxa da carga redutora, tanto na do carbono de topo quanto na taxa do carbono de injeção. A figura 5.2 mostra a variação da taxa do carbono de injeção praticado no período estabelecido. Diferentemente do carbono de topo que se manteve mais estável, observa-se que o a injeção trabalhou com uma variação maior durante o período do teste (demarcado pelo retângulo vermelho).

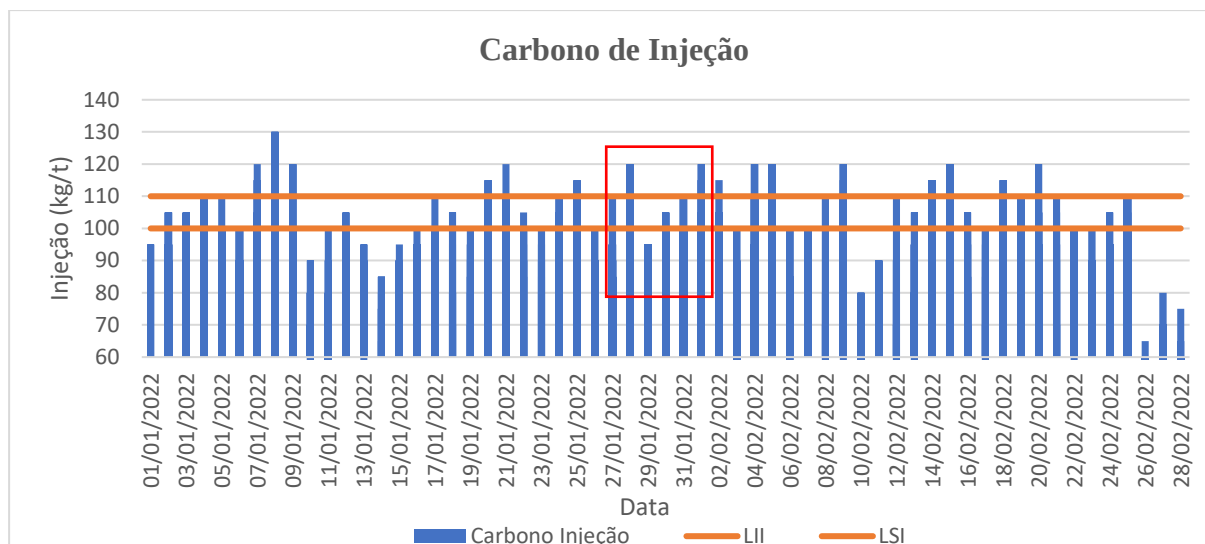


Figura 5.2 – Taxa do carbono de injeção por dia

Cabe ressaltar que o aumento da taxa de injeção ocasiona o aumento do nível térmico do forno, porém isso não foi verificado nos dois dias em que a taxa se manteve em cerca de 120kg/t, conforme consta nos resultados abaixo. Já no período posterior ao teste, nota-se uma oscilação no consumo de carbono de topo assim como o aumento expressivo do mesmo, resultando em uma média de carbono total maior que durante e antes do teste, conforme mostra a Figura 5.3.

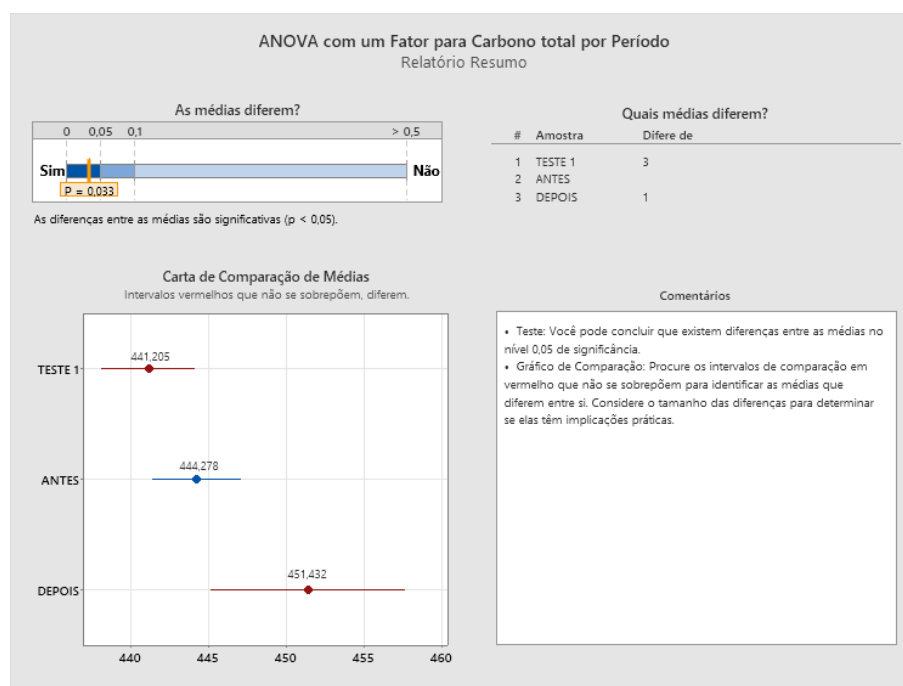


Figura 5.3 – ANOVA para o Carbono Total

A oscilação diária apresentada posteriormente ao teste foi provocada por uma série de fatores observados que resultaram em uma instabilidade operacional, sendo eles:

- eventos de parada no secador de carga metálica;
- aumento da umidade do minério y;
- aumento da umidade do carvão enforcado;
- sequências de engaiolamentos.

Nesse mesmo período, é possível observar com base nos resultados que ocorreu o aumento do teor de Si e redução da temperatura do gusa, eventos que afetaram a estabilidade do nível térmico do forno.

O alto-forno em que o teste foi realizado, utiliza do secador de minério para a carga metálica, sendo a umidade da carga muito baixa, variando de 0 a 1%. Com isso, foi verificado apenas a umidade do carvão enforcado no alto-forno, pois foi o parâmetro que sofreu variação entre os períodos, conforme mostra a Figura 5.14, sendo que durante o teste a média foi de 5,76%, e posteriormente passou para 7,91%,

O aumento da umidade da carga pode afetar o processo produtivo, visto que provoca o aumento da quantidade de calor necessária para a redução da matéria-prima e consequentemente o aumento no consumo do carvão vegetal.

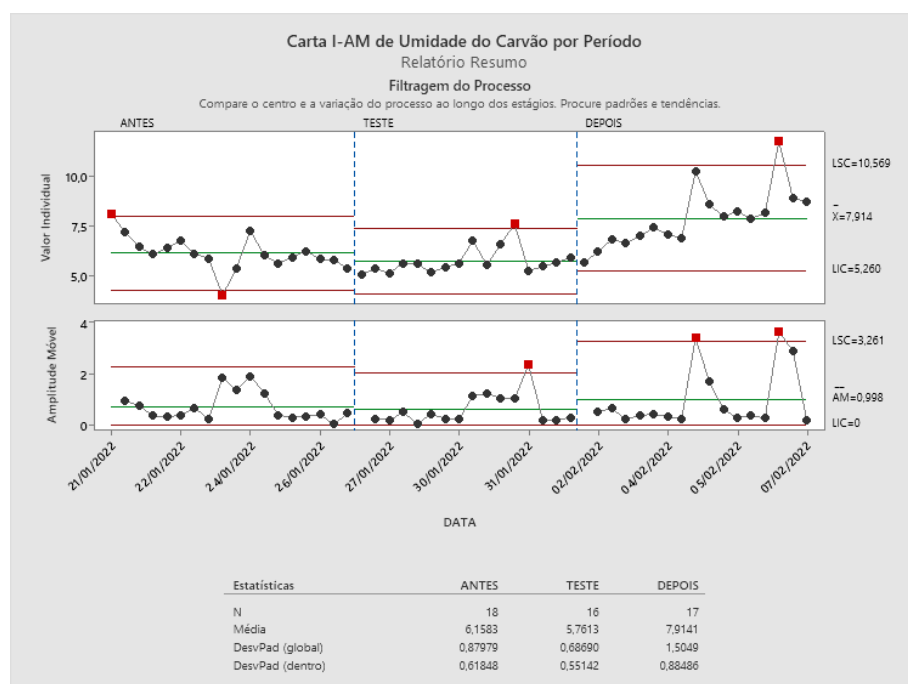


Figura 5.4 – Umidade do carvão enforcado

5.1 Indicadores de Desempenho de Controle do Nível Térmico

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos indicadores que foram avaliados para realizar a análise de oscilações do nível térmico do alto-forno. Os indicadores definidos no tópico 4.1 desta pesquisa, foram analisados no período do teste, de 27/01/2022 a 01/02/2022, além dos períodos anterior e posterior ao mesmo.

Tabela 5.1 – Resultados dos indicadores de nível térmico

Período	Temp. Gusa (°C)	% Si Gusa	% Mn Gusa	% P Gusa	Basicidade Binária	% SiO ₂ escória	% CaO escória
Média Antes	1389,6	0,69	0,32	0,085	0,669	48,18	32,20
Desvio Padrão	14,69	0,18	0,06	0,006	0,043	1,53	1,63
Média Teste	1381,6	0,59	0,33	0,078	0,665	46,93	31,16
Desvio Padrão	17,01	0,23	0,07	0,005	0,042	1,78	1,12
Média Depois	1376,8	0,68	0,43	0,067	0,651	46,32	30,07
Desvio Padrão	19,57	0,35	0,11	0,003	0,064	2,05	2,04

A tabela acima apresenta o fechamento dos resultados, que foram obtidos e analisados com o uso do software estatístico *Minitab*, para que os dados possam ser apresentados com maior confiabilidade, em um nível de 95% de confiança.

5.1.1 Temperatura de vazamento do gusa

Analisando a temperatura do ferro gusa, fica evidenciado a redução da média da temperatura durante o teste. A Figura 5.5 apresenta a carta I-AM da temperatura de vazamento do gusa, onde é possível perceber uma temperatura levemente mais baixa durante o teste, do que antes do mesmo, e maior do que depois do teste, período em que fica evidente maiores oscilações da temperatura.

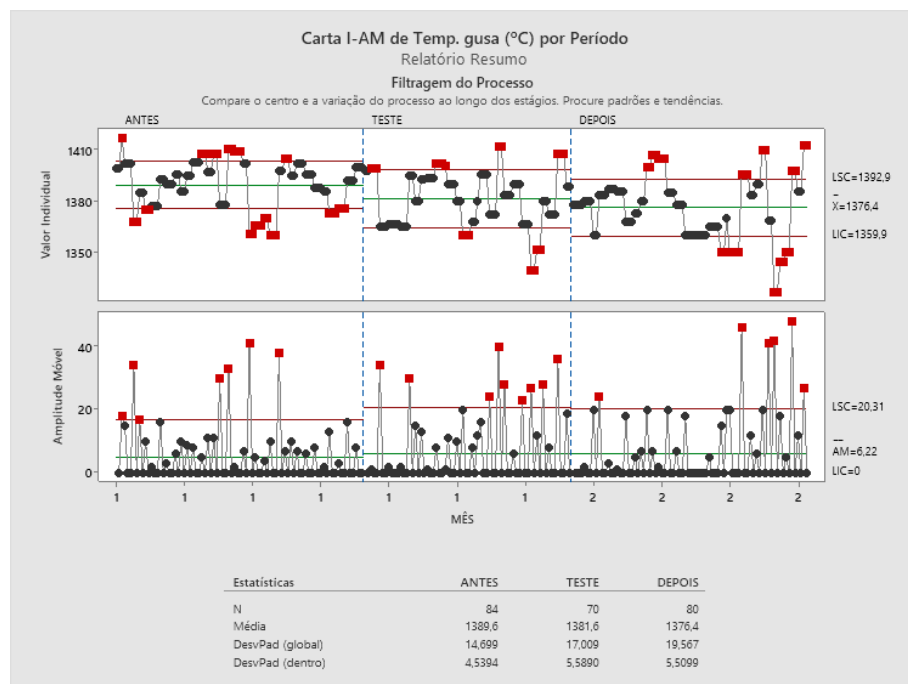


Figura 5.5 – Carta I-AM da temperatura de vazamento do ferro gusa.

A carta I-AM para o indicador de temperatura de vazamento do gusa apresenta que durante o período do teste, houve uma pequena queda na média dos resultados, passando de 1389,6°C para 1381,6°C. É possível notar que nos três períodos, existe uma variabilidade nos dados da temperatura, o que pode predizer que a operação vinha sendo realizada com instabilidades operacionais, afetando a estabilidade das corridas.

Para o alto-forno 2, é confirmado como queda de nível térmico quando a temperatura do gusa passa a ser menor que 1360°C com tendência de redução, sendo que uma queda brusca de nível térmico se dá com temperatura menor que 1330°C, conforme a norma técnica da siderúrgica. Porém, em situações de variações bruscas na temperatura, ações são adotadas para conter uma redução expressiva. Diante disso, a redução de temperatura que ocorreu no período de teste não resulta em queda de nível térmico, mas sim como uma oportunidade em se obter uma redução no consumo do combustível.

As Figuras 5.6 e 5.7, mostram respectivamente, que a média dos resultados durante o teste difere principalmente do período anterior, visto que o valor é mais elevado que os outros dois. E, fazendo o teste para os desvios padrão, o resultado obtido durante o teste não se difere dos outros dois, pois é possível observar que o mesmo se sobrepõe aos demais períodos.

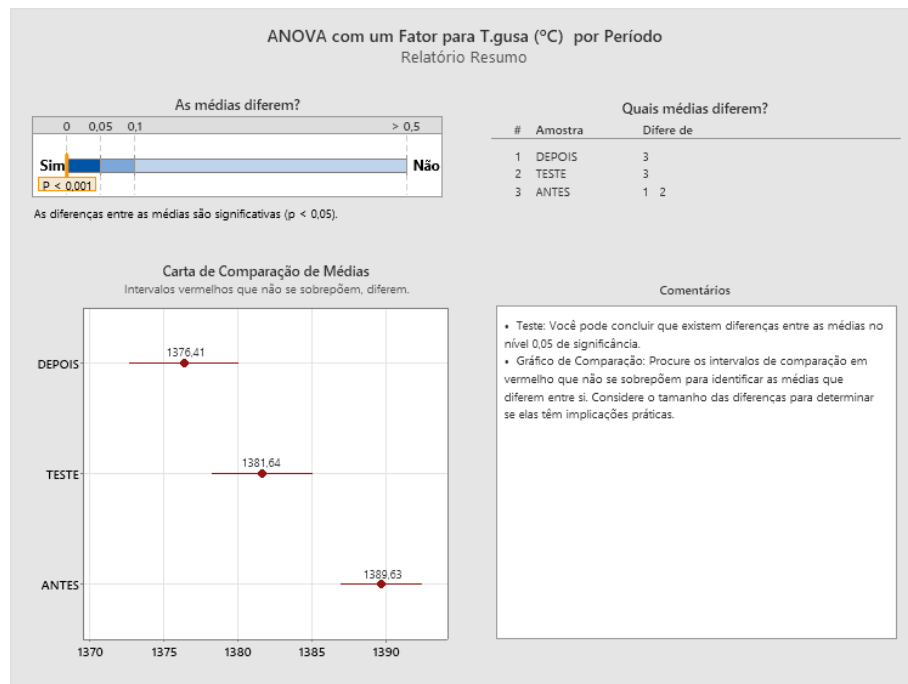
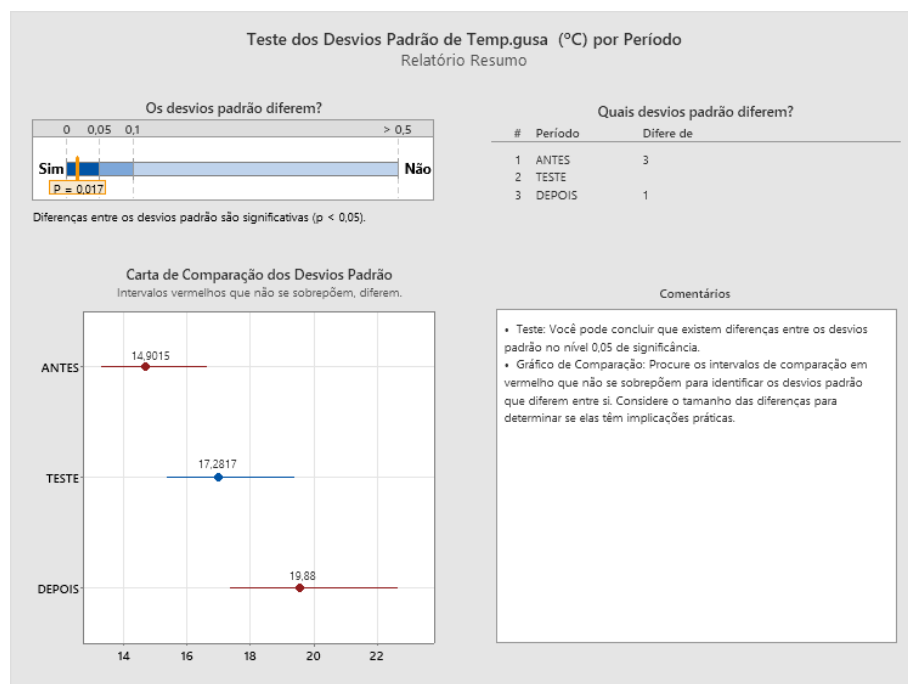


Figura 5.6 – Carta I-AM para os dados da temperatura do ferro gusa.



5.7 – Teste de desvio para a temperatura do gusa.

5.1.2 Análise do silício, manganês e fosforo

Avaliando a porcentagem de silício nas análises químicas do ferro gusa, observa-se que durante o período de realização do teste, a média dos resultados foi menor do que os demais períodos, conforme mostra a Figura 5.8.

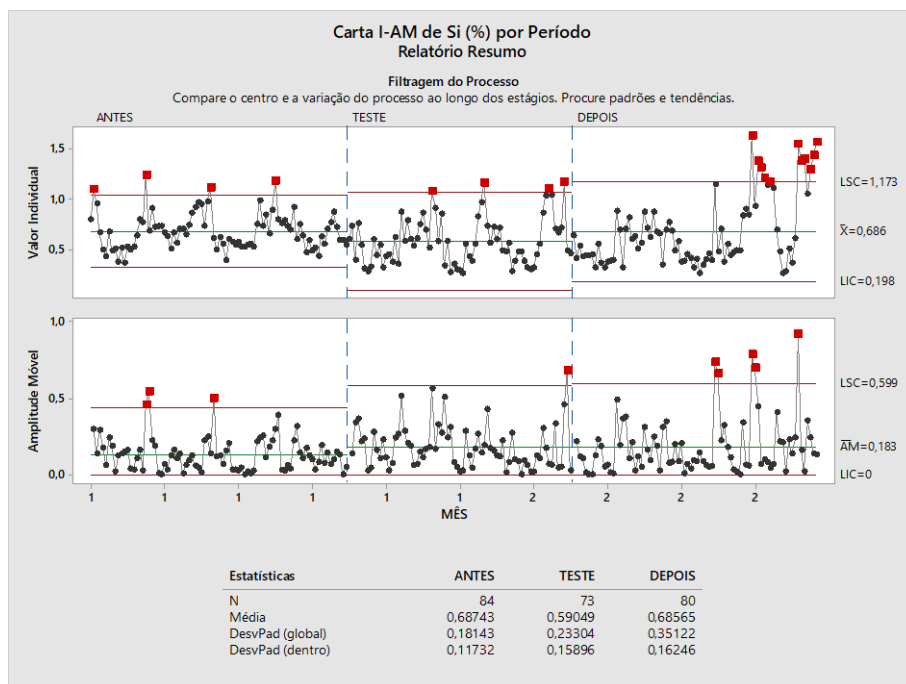


Figura 5.8 – Carta I-AM do teor de silício contido no ferro gusa.

Verifica-se que os valores individuais dos resultados apresentaram maiores oscilações depois do teste, além de apresentar desvio padrão elevado, que impacta no aumento do nível térmico do alto-forno, bem como no aumento do consumo de combustível.

O alto-forno em que foi realizado o teste, por ser o carvão vegetal o combustível, trabalha com uma faixa pré determinada para as análises de teor do Si no gusa, sendo o limite inferior de 0,25% e o superior de 0,80%, e o silício médio orçado para o primeiro trimestre do ano de 2022 em 0,61%. Considerando a faixa de trabalho e o orçamento, o resultado do silício durante o teste, além de atender a faixa estabelecida, possui maior aproximação com o silício orçado do forno, o que não acontece anteriormente e posteriormente ao teste.

Com base na ANOVA com um fator para o Si apresentado na figura 5.9, a porcentagem de silício do ferro gusa foi menor nos resultados durante os dias de realização do teste. O teste mostra que a porcentagem (teor) de Si no gusa passou de uma média de 0,69% (período que antecede o teste) para 0,59% durante o teste.

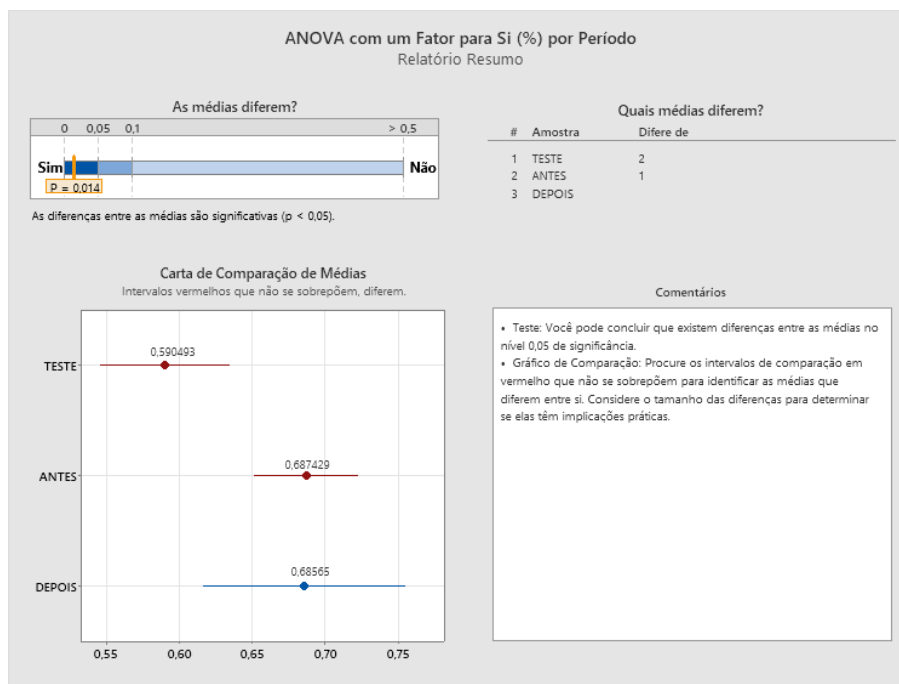


Figura 5.9 – Teste ANOVA do teor de Si do ferro gusa por período.

Realizando o teste para verificar o desvio padrão, mesmo existindo diferenças entre eles, verifica-se que a variação maior ocorreu no período posterior ao teste, conforme mostra a Figura 5.10, sendo significativamente diferente dos demais períodos.

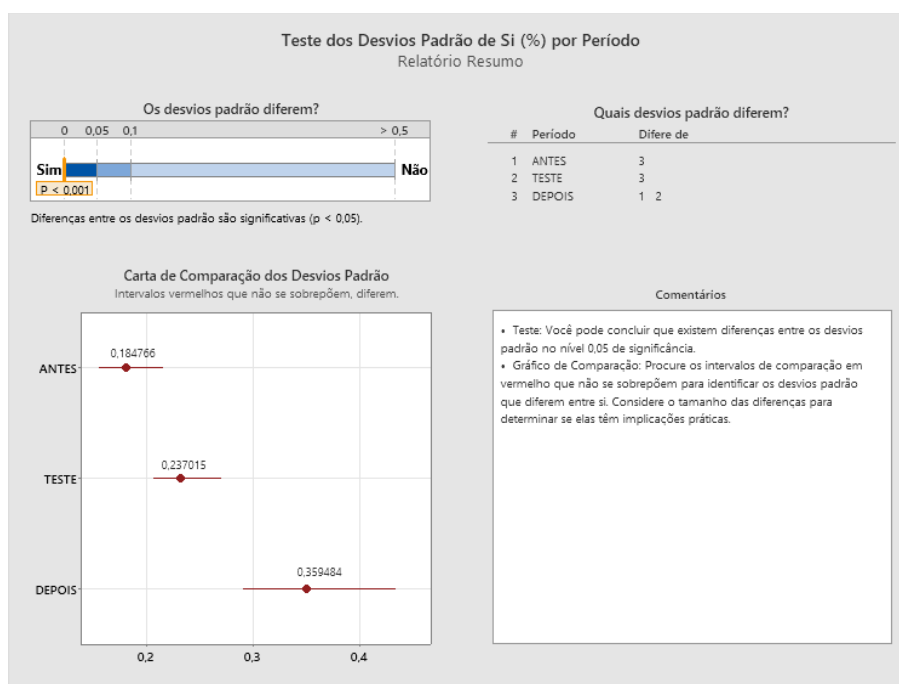


Figura 5.10 – Teste dos desvios para o teor de Si.

Esse resultado faz jus a literatura sobre o tema dessa pesquisa, em que é pontuado que a redução do silício acompanha a redução da temperatura, salientando que redução de ambos impacta na redução do consumo de carbono.

Para os teores de Mn e P do gusa, de acordo com a especificação do alto-forno 2, o teor de Mn deve estar entre 0,20% e 0,65 %, e o do P menor que 0,120%. Com relação a esses teores, o Mn apresentou-se com uma pequena elevação em sua média durante o teste, o que pode ter sido ocasionado devido aos *outliers* (pontos em vermelhos e que se diferenciam significativamente dos demais dados) no final do mesmo, já o P se apresentou com redução em sua média e desvio padrão, conforme mostra a Figura 5.11.

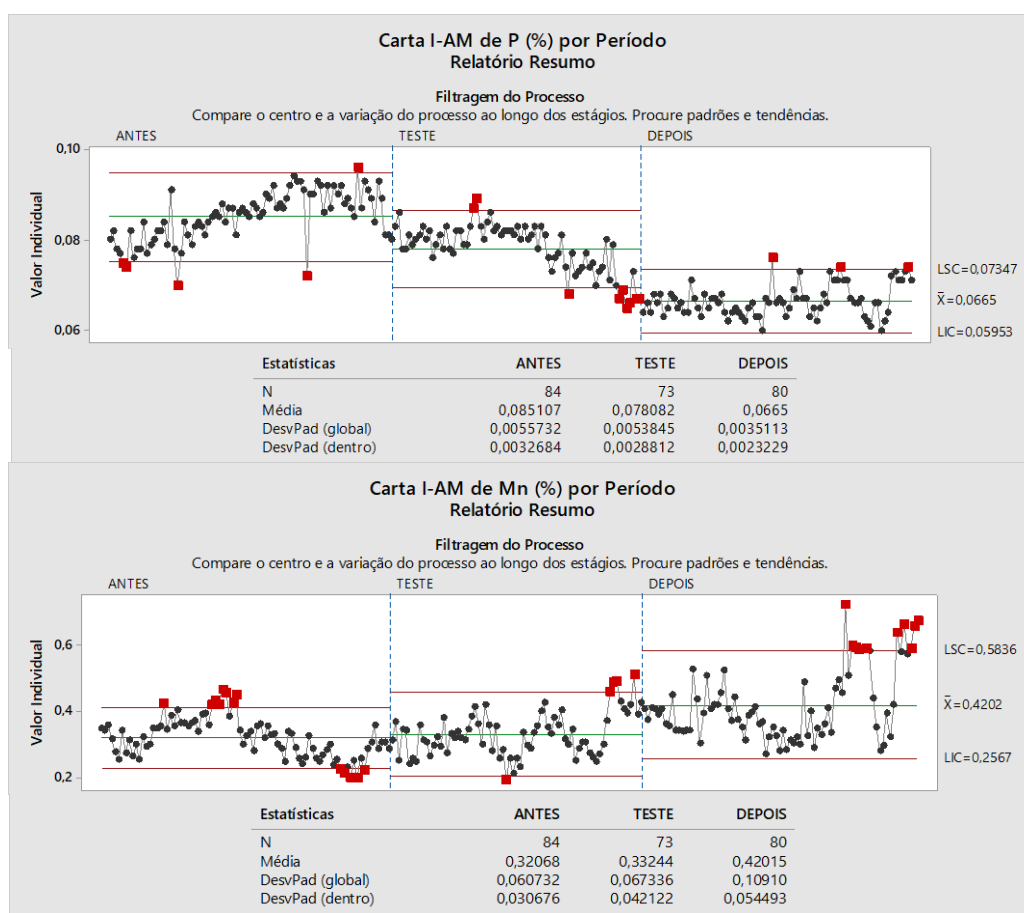


Figura 5.11 – Resultados para o Mn e P do ferro gusa

As Figuras 5.12 e 5.13 mostram respectivamente, que para ambos os resultados obtidos durante o teste diferem principalmente do período posterior a este, devido as variações e fatores que afetaram o período.

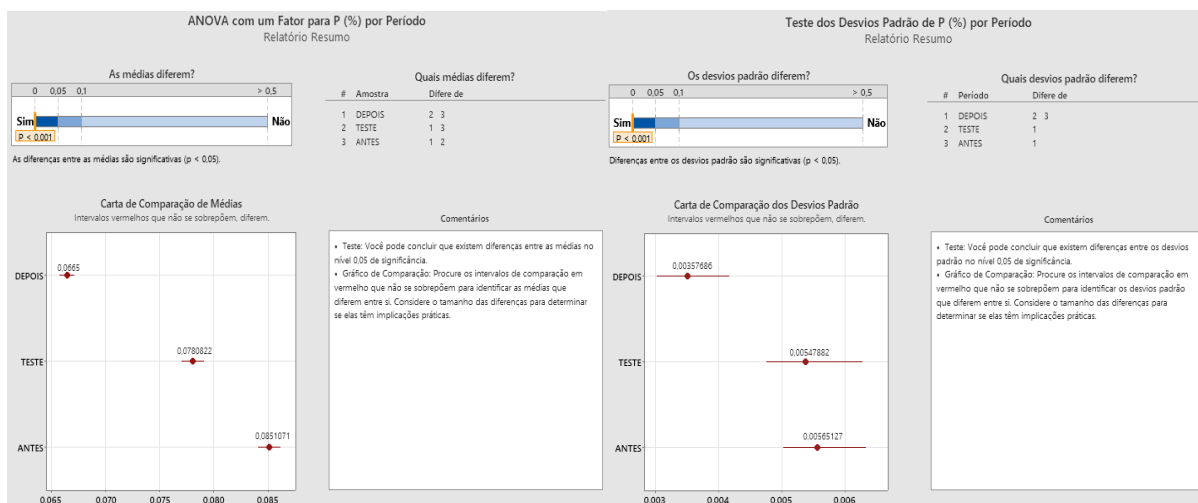


Figura 5.12 – ANOVA e teste de desvio padrão para o P

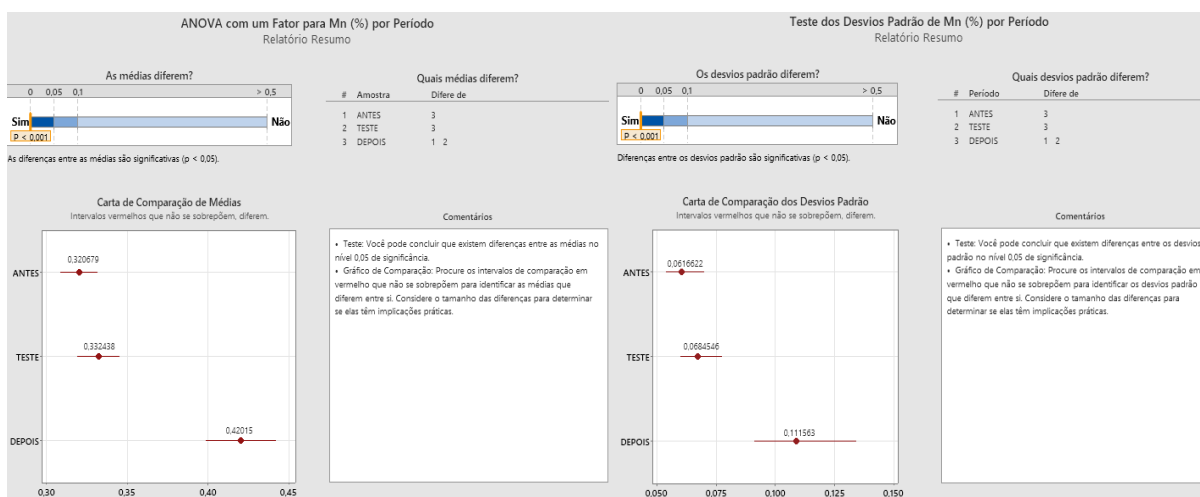


Figura 5.13 - ANOVA e teste de desvio padrão para o Mn

5.1.3 Análise da basicidade binária, sílica e óxido de cálcio

A basicidade binária é o resultado obtido da relação entre CaO/SiO_2 e o aumento da basicidade resulta no aumento da temperatura de fusão da mesma, assim como no aumento do nível térmico do alto-forno e do teor de Si do gusa, eventos que não foram verificados na pesquisa realizada.

Do dia 27/01 a 31/01 a carga metálica foi utilizada na proporção de 50% da Pelota 1, 20% da Pelota 2 e 30% do Minério 1, e no dia 31/01 foi realizada uma alteração no leito, onde o consumo passou para 50% da Pelota 1, 20% da Pelota 3 e 30% do Minério 1. A figura 5.14 mostra a configuração dos dois leitos utilizados no período do teste, bem como os resultados da composição química da escória.

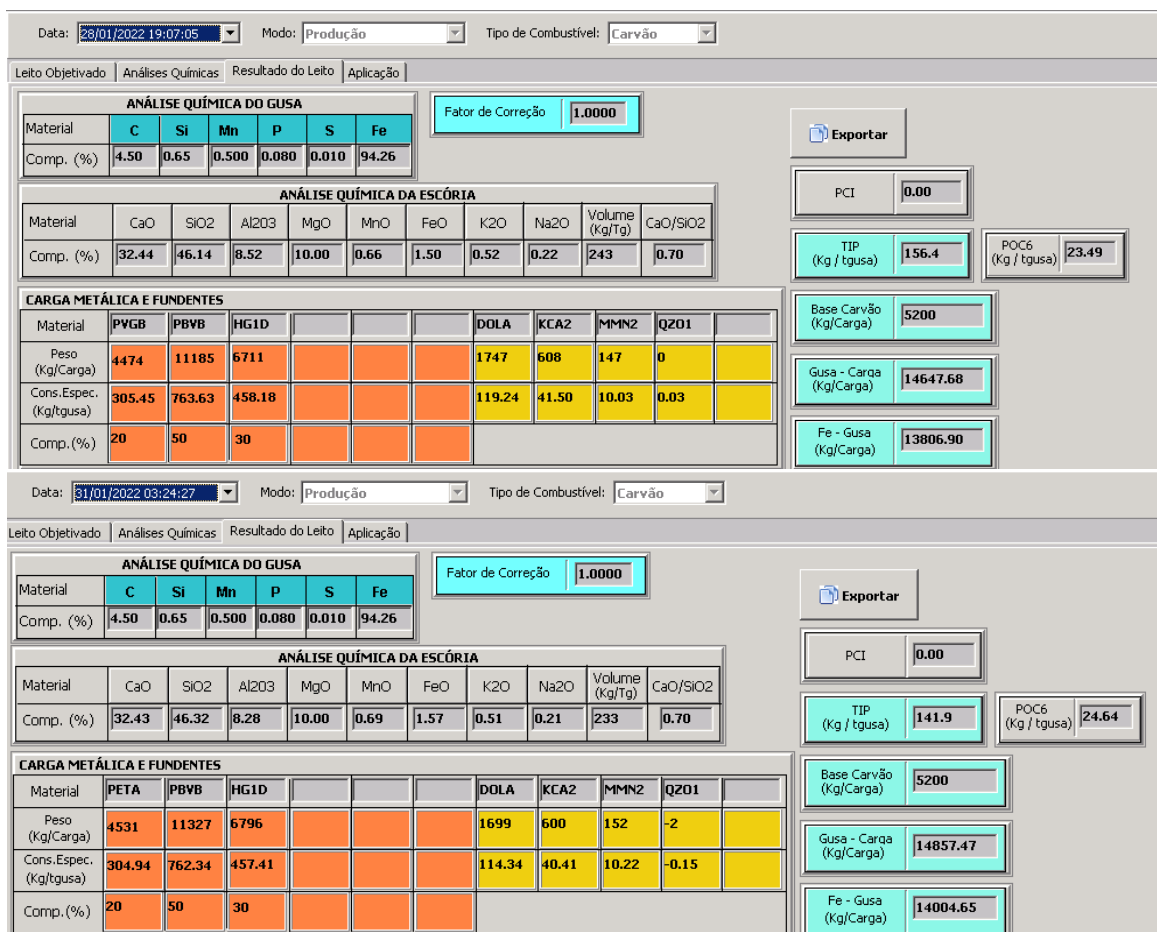


Figura 5.14 – Composição química da escória e consumo do leito

Mesmo com a alteração da carga metálica, a variação da composição química da escória é mínima, o que não resulta em uma variação expressiva na basicidade. A Figura 5. 15 mostra as estatísticas para os resultados das análises de SiO₂ e CaO absorvidos pela escória, evidenciando a redução de ambos durante o teste.

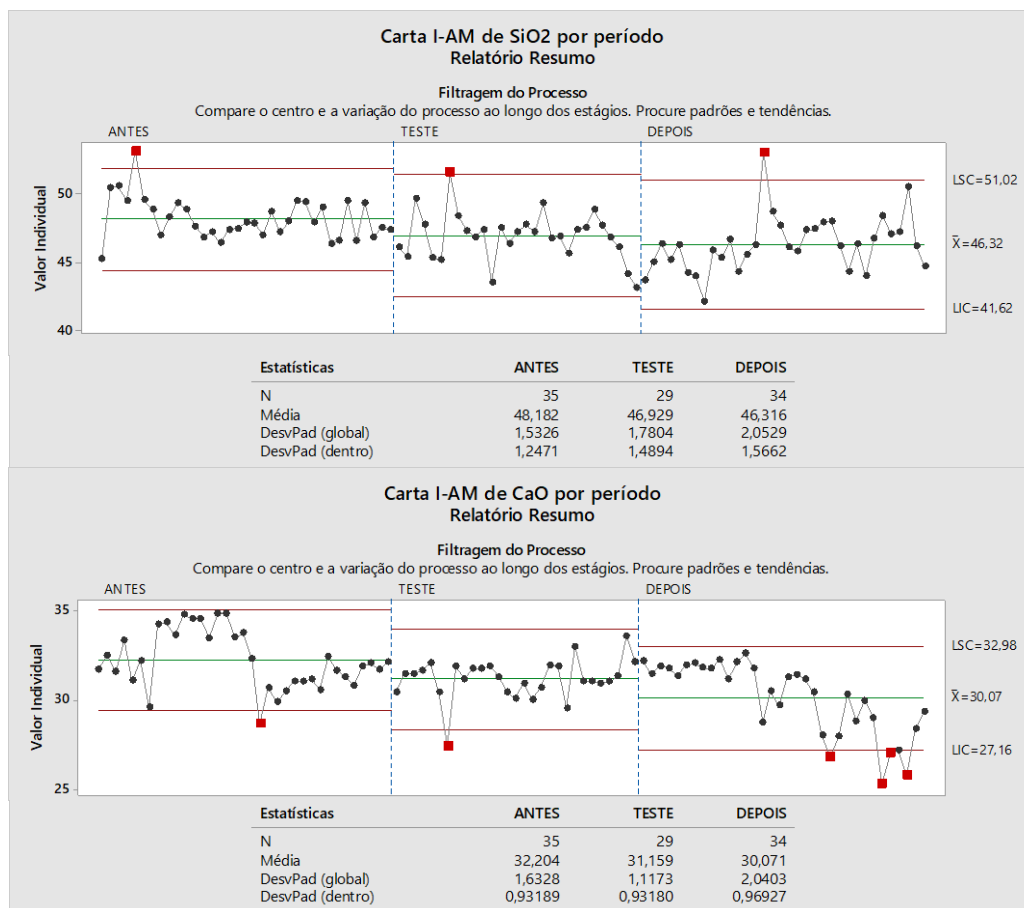


Figura 5.15 – Resultados das médias para as análises de CaO e SiO₂ da escória

Seguindo a relação entre CaO/SiO₂, o que se espera de acordo com os dados acima é a redução da basicidade binária e a Figura 5.16 mostra a ocorrência desse resultado durante o período do teste. A redução da basicidade binária, mesmo que pequena, também evidencia o controle e a redução do nível térmico, conforme já mencionado anteriormente. O alto-forno da pesquisa, possui a faixa da basicidade estabelecida entre 0,50 e 1,00, com basicidade objetivada de 0,70, dessa forma o valor médio durante o teste está atendendo a faixa de trabalho.

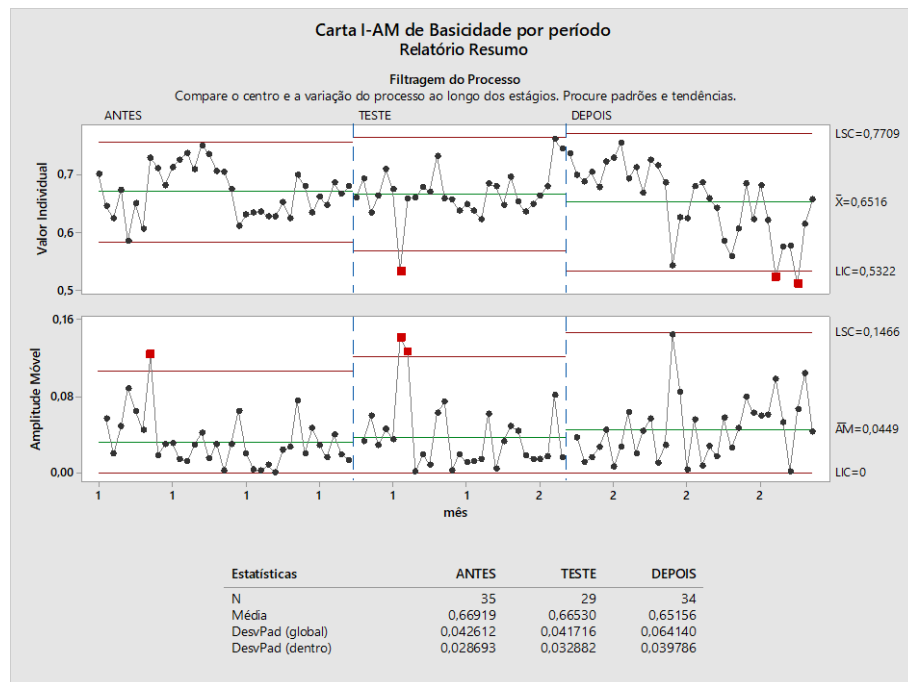


Figura 5.16 - Carta I-AM para a basicidade binária.

Verificando os resultados entre os períodos, a Figura 5.17 e 5.18, mostram respectivamente que não existem diferenças significativas entre as médias. Para o desvio padrão, o resultado durante o teste não se difere dos outros dois períodos, os quais apresentaram diferenças significativas.

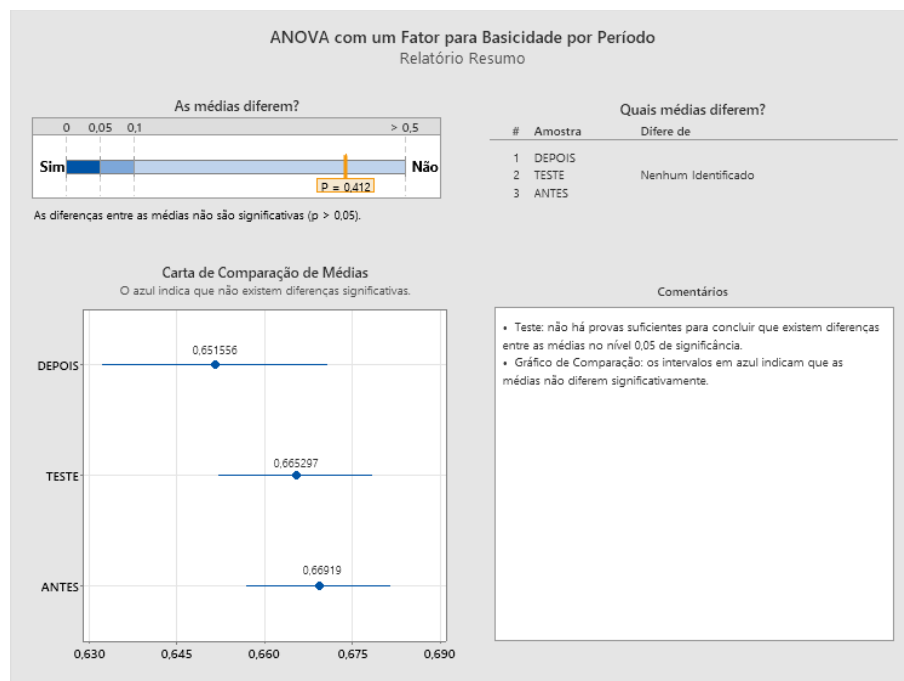


Figura 5.17 – ANOVA para a basicidade

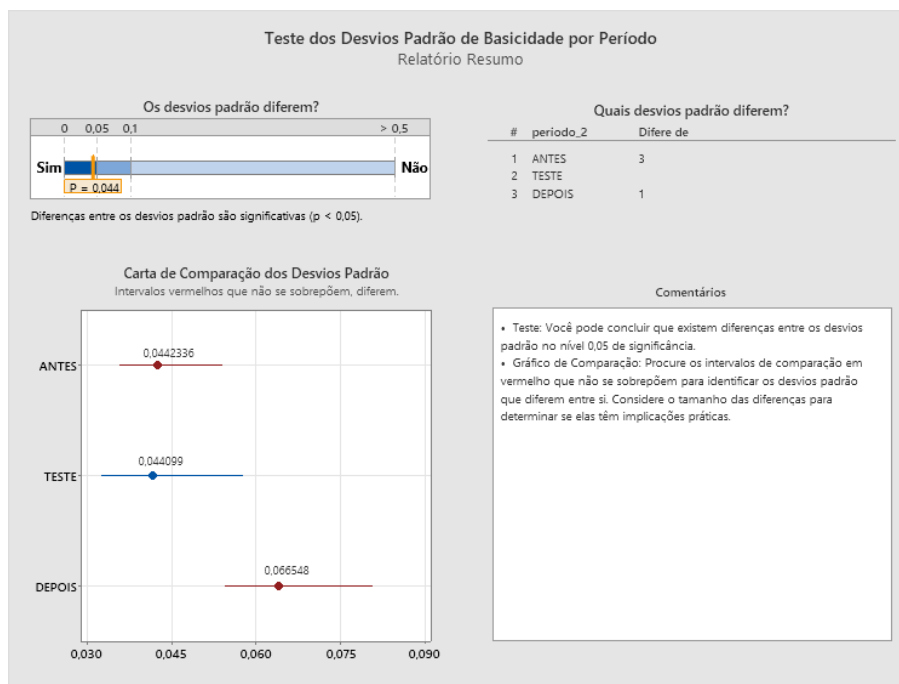


Figura 5.18 – Teste dos desvios para a basicidade

5.1.4 – Permeabilidade

Conforme visto na revisão bibliográfica, a estabilidade do consumo de carbono afeta a permeabilidade do forno, quando se tem o aumento do consumo de carbono de topo o leito do alto-forno tem perda da permeabilidade. Durante a realização do teste, como o consumo do carbono de topo se manteve em uma faixa mais estável que os outros dois períodos, o efeito na permeabilidade pode ser observado, com uma variabilidade menor e o aumento da média dos resultados do leito durante teste, conforme mostra a Figura 5.19.

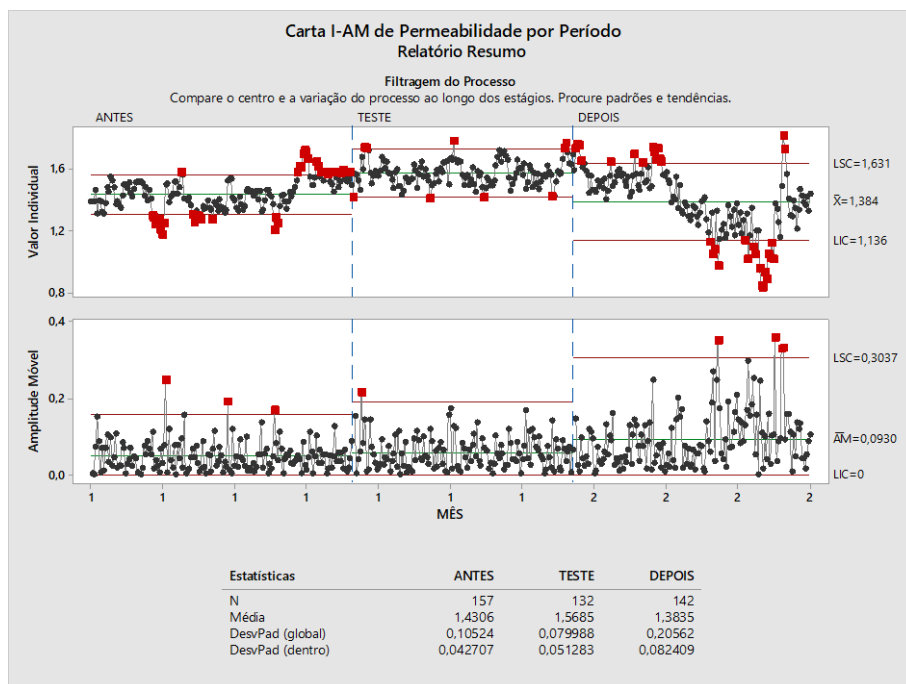


Figura 5.19- Permeabilidade do leito do forno

A análise de variância e o teste para os desvios padrão são apresentados na Figura 5.20 e Figura 5.21, respectivamente. Ambas evidenciam as diferenças significativas entre os resultados, já que o único período em que se observa menor variância, tanto para a média quanto para o desvio padrão, foi durante o teste.

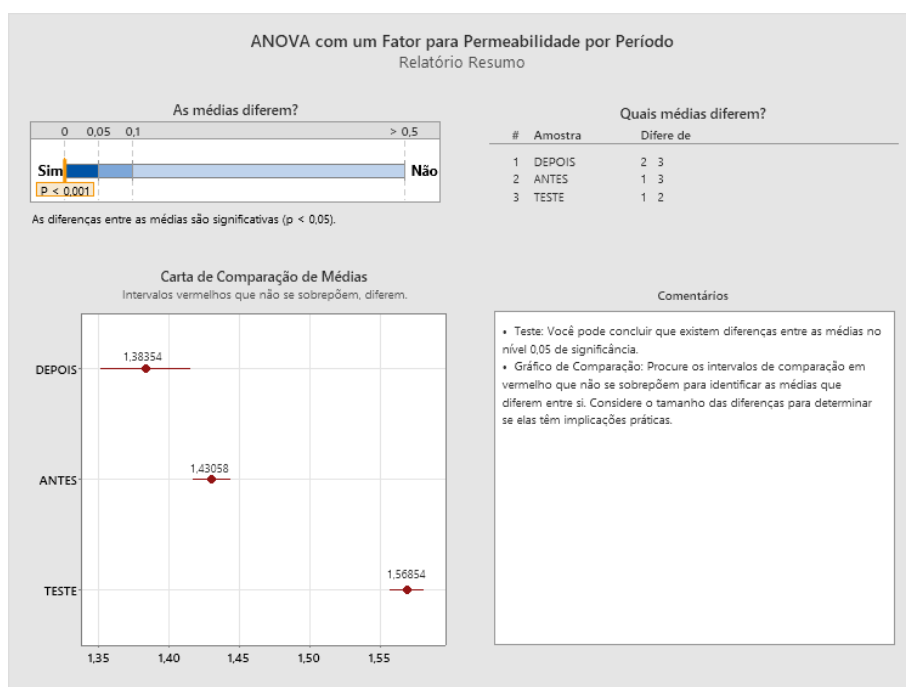


Figura 5.20 – Anova para a permeabilidade

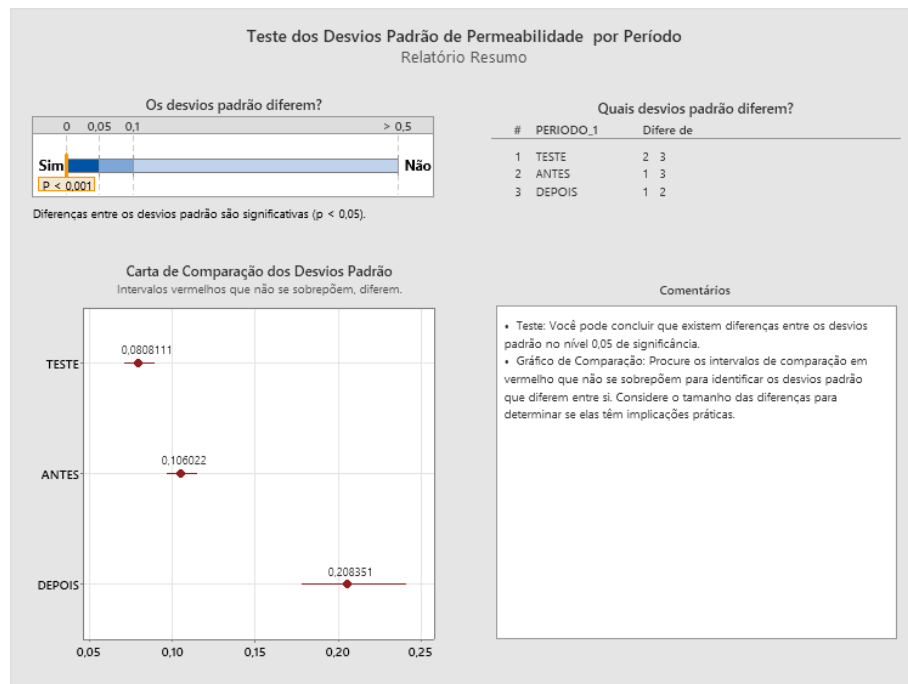


Figura 5.21- Teste dos desvios para a permeabilidade

5.1.5 – Análise de regressão

Com base nos resultados apresentados até o momento, é possível realizar uma correlação entre o Si e a temperatura de vazamento do gusa, a fim de verificar se realmente existe a influência do primeiro na temperatura de vazamento do gusa, ou seja, a influência no nível térmico do forno. Realizando uma regressão através do *Minitab*, conclui-se que a relação entre a temperatura do gusa e o Si é estatisticamente significativa, e a equação do modelo se dá conforme mostra a Figura 5.22.

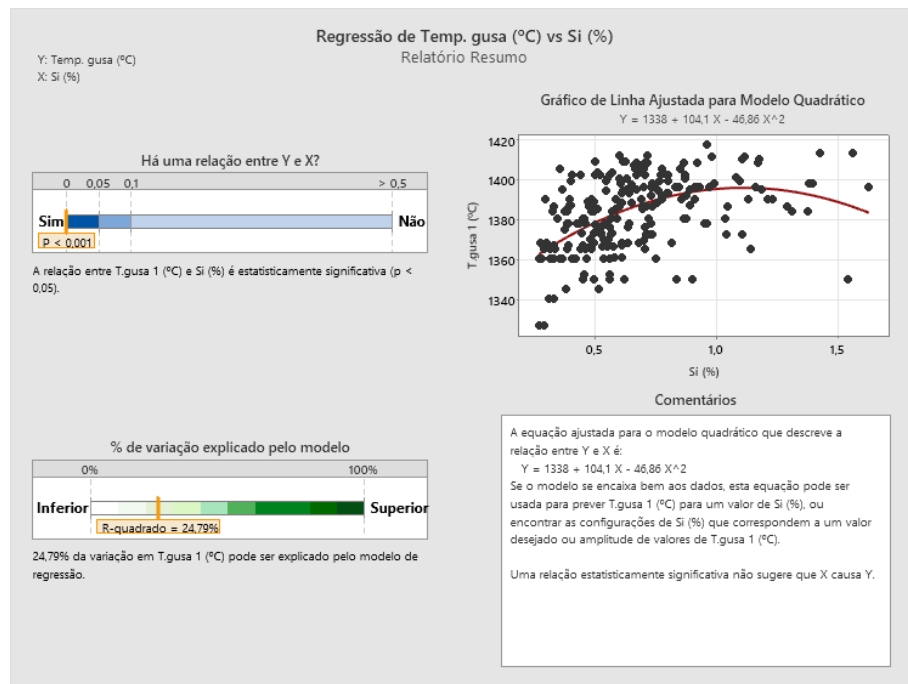


Figura 5.22 – Regressão para temperatura do gusa e silício

Para verificar se o consumo de carbono no alto-forno afeta os principais indicadores do nível térmico, silício e temperatura do gusa, uma regressão múltipla foi realizada, como mostra a Figura 5.23. Pode-se concluir estatisticamente que a relação entre as variáveis é significativa e que a equação encontrada pode ser utilizada para encontrar o valor do carbono total para os valores específicos das variáveis (Si e Temperatura do gusa).

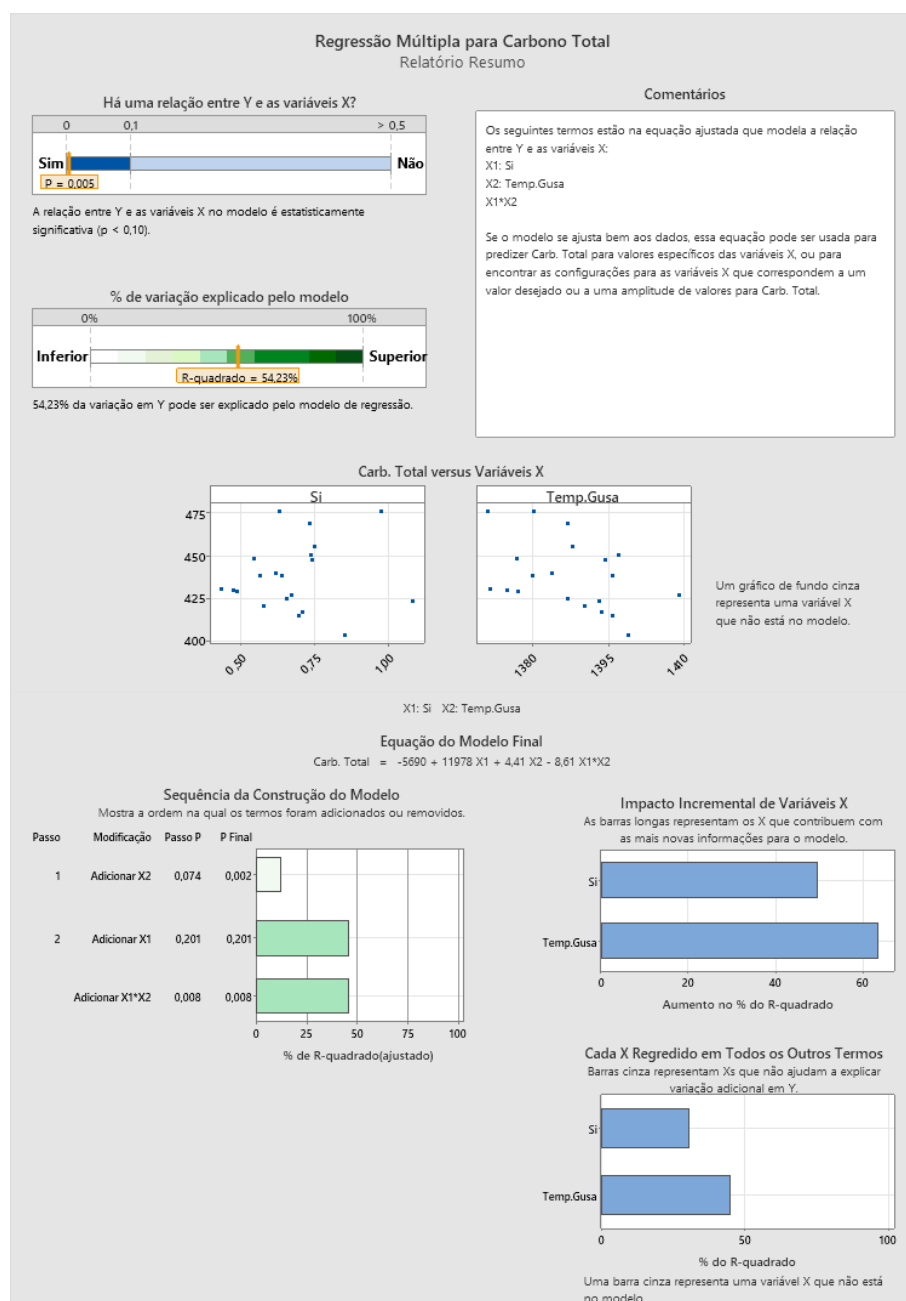


Figura 5.23 – Regressão múltipla para o carbono total

5.1.6 Impacto na produção diária

No quesito da produção do gusa por dia, a realização do teste não impactou no atendimento ao programado, que conforme orçamento era de 985 toneladas de gusa entregue a aciaria. A figura 5.24 mostra a quantidade de gusa entregue por dia, sendo possível observar que apenas durante o teste, a produção entregue cumpriu o orçamento em todos os dias.

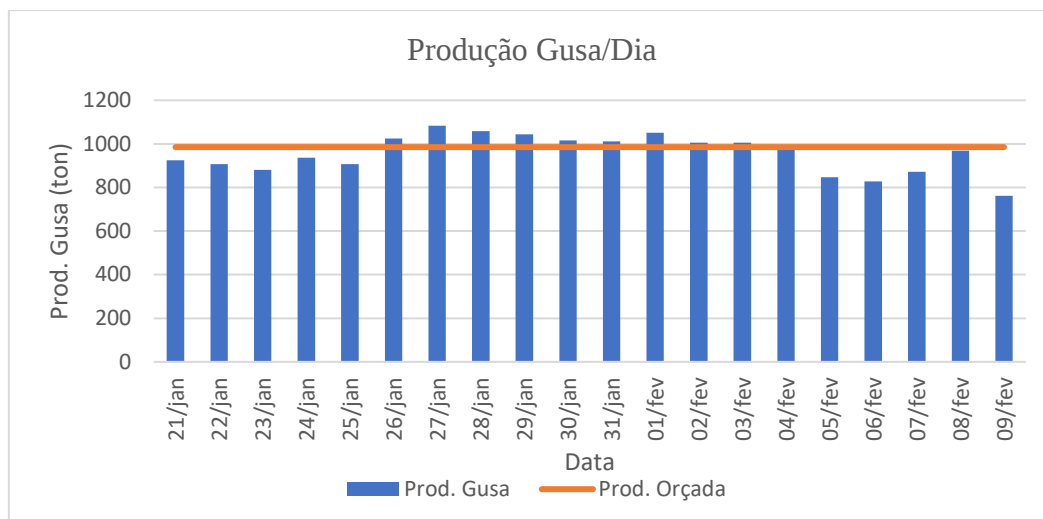


Figura 5.24 – Produção de gusa por dia

A realização do teste bem como a redução no consumo de carbono, da temperatura do gusa e consequentemente a redução do silício incorporado no gusa, não impactou na produção do gusa, sendo que o atendimento da produção entregue durante o mesmo foi de 105,96%.

6. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos com a realização do teste e com as análises dos indicadores de desempenho, conclui-se que:

- Com a realização do teste, a quantidade de cargas de carbono de topo realizadas por dia manteve mais estável bem como a ausência de variações bruscas na taxa de carbono de topo por carga. Além disso, foi possível verificar uma maior estabilidade dos indicadores analisados, evidenciando assim, uma melhora no controle do nível térmico do alto-forno, em comparação com os outros dois períodos (ANTES e DEPOIS do teste);
- Com relação a análise dos indicadores de nível térmico do forno, a temperatura do ferro gusa e a porcentagem de silício no mesmo se manteve com resultados melhores nos dias de realização do teste, em comparação com o período ANTES e DEPOIS deste, evidenciando assim uma estabilidade maior nível térmico do forno. Avaliando a qualidade química da escória, a basicidade binária e a sílica apresentaram uma pequena redução nos resultados. O aumento da basicidade acompanha o aumento do nível térmico do alto-forno, e sua redução, mesmo que pequena, segue a linha da estabilidade e da redução no nível térmico durante o teste.
- A redução do nível térmico e seu controle (redução no teor de silício e temperatura do ferro gusa), mostra uma oportunidade na redução do consumo total de carbono, o que afeta diretamente o custo do ferro gusa produzido, além de ser possível obter uma melhora na produtividade.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Sugere-se a realização de um segundo teste de controle do nível térmico, controlando os limites da taxa de consumo do carbono de topo juntamente com o controle do consumo do carbono de injeção, visto que com um maior controle da taxa de injeção de finos é possível obter resultados mais rápidos do controle do nível térmico e sua estabilidade;
- A boa operação do alto-forno e controle dos parâmetros operacionais é de extrema importância para o processo produtivo, diante disso, a aplicação de um treinamento padronizado para os operadores do forno, com determinada periodicidade e atualizações em caso de necessidade, se faz necessário.;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de Biomassas para a sua injeção em Altos-Fornos**. 2014. 133f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia dos Materiais – REDEMAT. Ouro Preto, MG, Brasil, 2014.

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte**. 2008. 132f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia dos Materiais – REDEMAT. Ouro Preto, MG, Brasil, 2014.

BELO, E.O. **Análise de falhas dos equipamentos de um alto-forno**. 2019. 71f. Monografia em Especialização (Especialista em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, Brasil, 2019.

CALDERON, E. R.D. C, D'ABREU, J. C. **Mínimo consumo de carbono na redução em alto-forno**. ABM Week Proceedings, v. 1, p. 530–537. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

CARVALHO, L. A. **Redes Neurais Artificiais para Modelagem de Altos-Fornos**. 2019. 157f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia dos Materiais – REDEMAT. Ouro Preto, MG, Brasil, 2019.

FALEIRO, R. M. R. **Modelamento estatístico do consumo de carvão vegetal dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil em função da produção de ferro-gusa e das cargas ferrosas**. 2013. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2013.

FERNANDES, M. V. **Efeito do Tipo de Carvão Injetado nas Ventaneiras do Alto-Forno no Consumo de Combustíveis (Fuel-Rate)**. 2007. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

GASPARINI, V. M. **Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-Fornos a Coque Aplicado a Altos-Fornos Industriais**. 2016. 154f. Tese (Doutorado em

Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2016.

IaBr Estatística da Siderurgia 1º trimestre. Disponível em: < <https://acobrasil.org>> Acesso em: 24 julho. 2021

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa**. 2018. 124f. Tese (Pós-Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, Brasil, 2018.

KALUGIN, I. **Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI**, 42nd International Meeting on Ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

MOURÃO, B. M., YOKOJI, A., MALYNOWSKYJ, A., **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

RIZZO, E.M.S. **Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno**. São Paulo: ABM, 2009. 135p. Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos: conhecimentos básicos.

SAMPAIO, R. S. **Uso de Carvão Vegetal em Mini Altos-Fornos Situação Atual com Tendências 2025**. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Belo Horizonte, MG, Brasil, 2008.

SINDIFER - SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Anuário estatístico 2021: Produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil**. Minas Gerais, 2021.

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) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

