



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

**“O IMPACTO DO COMPRIMENTO DO FURO DE GUSA NOS
PARÂMETROS OPERACIONAIS DO ALTO-FORNO”**

Lucas Westphal

Ouro Preto, 2022

Lucas Westphal

“O impacto do comprimento do furo de gusa nos parâmetros operacionais do alto-forno”

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

Ouro Preto, 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

W537i Westphal, Lucas.

O impacto do comprimento do furo de gusa nos parâmetros operacionais do alto-forno. [manuscrito] / Lucas Westphal. - 2022.
45 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Assis.

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

1. Altos-fornos. 2. Altos-fornos - Cadinho. 3. Ferro fundido. I. Assis, Paulo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Westphal

O impacto do comprimento do furo de gusa nos parâmetros operacionais do alto-forno

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

Aprovada em 26 de setembro de 2022

Membros da banca

Dr. Paulo Santos Assis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Jorge Luiz Brésia Murta - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Alfredo Carlos Bitarães Quintas - (Gerdau S.A.)

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 29/09/2022



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Santos Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/09/2022, às 17:08, 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 **0405722** e o código CRC **F5B86E96**.

RESUMO

O aço é um dos materiais mais versáteis e utilizados no mundo, tendo duas formas de ser produzido, através do forno básico a oxigênio, responsável por 78% de todo aço produzido no Brasil, e também por meio de forno elétrico a arco. Para a produção do aço pelo forno básico a oxigênio é utilizada como matéria-prima ferrosa, sucata e ferro-gusa. O ferro-gusa é produzido no alto-forno, reator metalúrgico que trabalha em contracorrente, sendo que o combustível e a carga metálica se dirigem em sentido descendente, e os gases em sentido ascendente, reduzem os óxidos de ferro a ferro metálico. O gusa e a escória ficam depositados no cadinho, parte do alto-forno, e deve ser drenado constantemente através de um furo, chamado furo de gusa; após ser drenado o cadinho deve ser tamponado com uma massa que deve suportar grandes temperaturas e pressões, além de ser sinterizada de forma rápida. Essa massa ajuda a proteger as paredes refratárias do cadinho, porém caso sejam muito grandes ou menores do que o ideal pode comprometer a produtividade e a estabilidade do reator. O presente trabalho visa estudar através de ferramentas de análise de dados os impactos do comprimento do furo de gusa nos parâmetros operacionais de um alto-forno de grande porte e propor um novo padrão de obturação dos furos de gusa que proporcione maior comprimento de furo e menor variação com comprimento.

Palavras-chave: Alto-forno – Cadinho – Furo de gusa

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Representação do fluxo de produção de uma usina siderúrgica integrada	12
Figura 3.2	Estrutura externa do alto-forno	14
Figura 3.3	Estrutura interna do alto-forno	16
Figura 3.4	Cadinho de alto-forno	16
Figura 3.5	Sequência de eventos durante uma corrida do alto-forno	17
Figura 3.6	Amostra do núcleo do homem morto através das ventaneiras	18
Figura 3.7	Fluxo de líquidos no cadinho	19
Figura 3.8	Contorno de temperatura e perfil de desgaste	20
Figura 3.9	Efeito do cogumelo na distribuição de temperatura na região do furo de gusa (corte transversal)	20
Figura 3.10	Efeito do cogumelo na distribuição de temperatura na região do furo de gusa (corte longitudinal)	20
Figura 3.11	Situações de trabalho das brocas	21
Figura 3.12	Funções e propriedades requeridas das massas de tamponamento	23
Figura 5.1	Série temporal da média de desvio de massa por dia e média de comprimento de furo de gusa por dia	31
Figura 5.2	Correlação da média de desvio de massa por dia e média de comprimento do furo de gusa por dia	32
Figura 5.3	Série temporal do comprimento do furo de gusa para as duas massa de tamponamento utilizadas	33
Figura 5.4	Correlação entre média do índice de escória e média do comprimento do furo de gusa por mês	35
Figura 5.5	Correlação da média do comprimento do furo de gusa e o tempo de forno de forno fechado por mês	36
Figura 5.6	Série temporal da média do comprimento do furo de gusa por dia e produção diária	37
Figura 5.7	Correlação entre a média de comprimento do furo de gusa e a produção de ferro gusa por dia	38
Figura 5.8	Série temporal do comprimento dos furos de gusa	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Padrão de injeção de massa antigo	30
Tabela 4.2	Padrão de injeção de massa novo	30
Tabela 5.1	Média de comprimento do furo de gusa e desvio padrão por tipo de massa de tamponamento	33
Tabela 5.2	Desempenho das massas de tamponamento	34
Tabela 5.3	Média de comprimento e desvio padrão por furo de gusa antes e depois da mudança de padrão	38

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – Densidade (t/m³)

l - Comprimento do furo de gusa

Q^0 - Quantidade de massa prevista para ser injetada no momento da obturação

Q^f - Quantidade de massa injetada no momento da obturação do furo de gusa

LISTA DE SIGLAS

EAF – Forno elétrico a arco (Electric Arc Furnace)

BOF – Forno básico a oxigênio (Basic Oxygen Furnace)

AF – Alto-forno

FG – Furo de gusa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Processos de Produção do Aço	12
3.2 Princípios de Funcionamento do Alto-Forno	13
3.3 O Comprimento do Furo de Gusa	17
3.4 Perfuração do Furo de Gusa	21
3.5 Obturação do Furo de Gusa	22
3.6 Massa de Tamponamento	22
4 METODOLOGIA	24
4.1 Escolha do Alto-Forno	24
4.2 Avaliação dos Parâmetros Operacionais do Alto-forno	24
4.3 Análise dos Fenômenos	25
4.3.1 Média do comprimento do furo de gusa	25
4.3.2 Desvio padrão do comprimento do furo de gusa	25
4.3.3 Média de tempo de corrida	25
4.3.4 Média de desvio de injeção de massa	26
4.3.5 Média de pressão de injeção	26
4.3.6 Tempo de forno fechado	27
4.3.7 Média de índice escória	27
4.3.8 Porcentagem de corrida aberta dentro do intervalo previsto	27
4.3.9 Produção de ferro gusa	27
4.3.10 Número de trincas	28
4.3.11 Número de reparos de boca	28
4.3.12 Índice de extrusão das massas de tamponamento	28
4.3.13 Número de arrombamentos	28
4.3.14 Número de corridas abertas com acerto do comprimento	28
4.3.15 Número de retornos de massa	29
4.3.16 Número de corridas obturadas sem sopro	29

4.4 Plano de Ação	29
5 RESULTADOS	31
6 CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é um reator químico complexo que possui os três estados físicos da matéria: sólido, líquido e gasoso. Este reator funciona em sentido contracorrente, sendo que os gases a uma temperatura inicial de cerca de 2200C, se dirigem em sentido ascendente e trocam calor com as camadas metálicas e de combustíveis que estão em sentidos descendentes. O cadinho situado na parte mais inferior do alto-forno é responsável pela sua vida útil de acordo com a durabilidade do refratário que reveste seu interior. Nessa parte do alto-forno ficam armazenados a escória e o ferro-gusa, além do homem morto, que flutua sobre os líquidos ou fica assentado no fundo do cadinho (ALVARES, 2019).

Com o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais eficiente para as regiões do ventre, rampa e cuba o cadinho se tornou um ponto ainda mais crítico para o aumento da duração da campanha do alto-forno. Cada vez mais o prolongamento de campanha é um tema de relevância na siderurgia, pois além de custos com obras, há perda de produção que compromete o atendimento aos clientes e com isso no faturamento da empresa. Atualmente uma reforma de um alto-forno tem duração acima de 60 (sessenta) dias e o custo de uma reforma é da ordem de US\$ 40,00 por tonelada anual de produção (SANTOS, 2005). No caso do alto-forno estudado na pesquisa que possui capacidade de produção de 7.500 t/dia o custo de uma reforma seria em torno de US\$ 110 milhões. Segundo estudos de Zhou *et al.* (2005), o comprimento do furo de gusa menor resulta em um fluxo periférico dos líquidos do cadinho do alto-forno e maior aporte térmico na parede refratária do mesmo, o que por consequência provoca o desgaste do material e refratário e com isso menor tempo de vida útil do reator.

A presente pesquisa visa por meio da análise de dados das operações de um alto-forno de grande porte, avaliar os impactos que a variação do comprimento do furo de gusa provoca nos parâmetros operacionais do reator, e em conjunto com o que é encontrado na literatura, relacionar esses parâmetros e definir um plano de ação a fim de alcançar a estabilidade do comprimento do furo de gusa, maior produtividade e estabilidade operacional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos da estabilidade do comprimento do furo de gusa na operação de um alto-forno de grande porte.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os dados disponibilizados para entendimento do motivo da variação do comprimento do furo de gusa.
- Identificar o impacto do comprimento do furo de gusa na estabilidade operacional da área de corrida.
- Relacionar os resultados das análises com a literatura.
- Propor um plano de ação para melhorar a estabilidade do comprimento do furo de gusa.

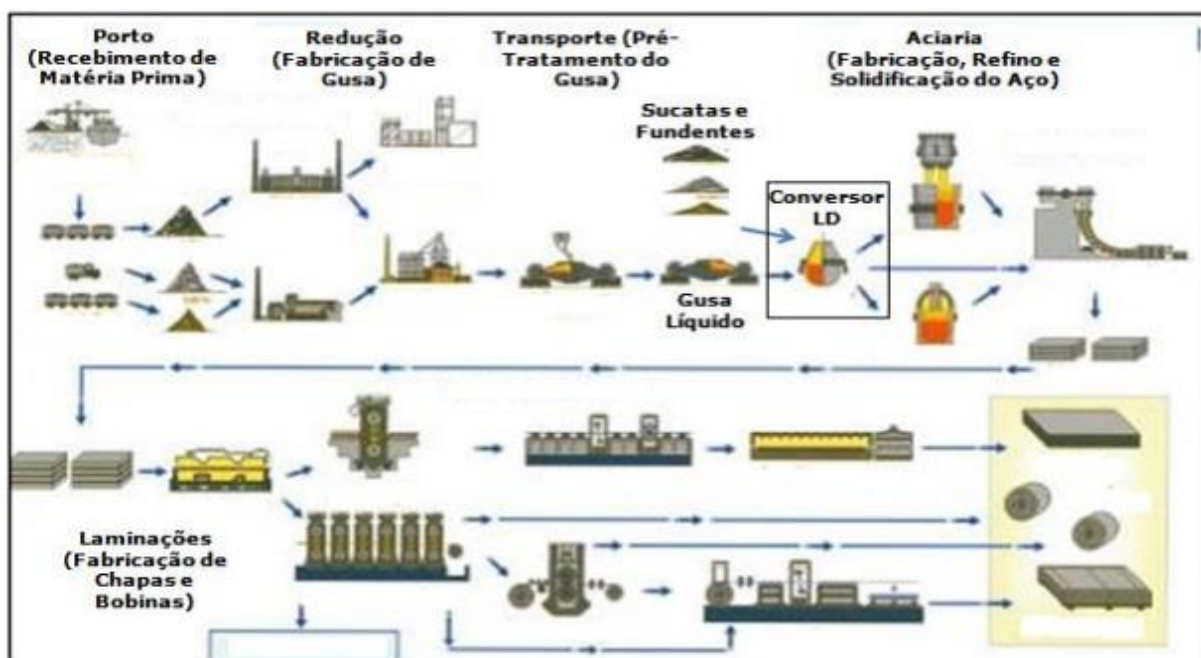
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos de Produção do Aço

O aço é muito utilizado nas indústrias de vários setores, por exemplo, a indústria automobilística, construção civil, máquina e equipamentos, dentre outros. Ele é obtido a partir de uma liga ferrosa com baixo teor de carbono, menor que 2,008%. O ferro é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e é encontrado em nosso ambiente na forma de minério (SILVA, 2011).

Atualmente para a produção do aço há dois principais processos distintos, através de fornos elétricos a arco (EAF) e fornos básico a oxigênio (BOF), este que produz cerca de 64% do aço produzido no mundo e aproximadamente 78% de todo aço produzido no Brasil. As usinas siderúrgicas podem ser classificadas de acordo com o seu processo produtivo de duas formas, usinas integradas que possuem três etapas básicas, que são, redução, refino e laminação, representadas na figura 3.1, e usinas semi-integradas, também chamadas de “mini-mills”, que operam apenas com as fases de refino e laminação (COSTA, V., ESCORSIM e COSTA, D., 2007).

Figura 3.1: Representação do fluxo de produção de uma usina siderúrgica integrada



(BORGES, 2016)

A rota de produção de aço através do forno básico a oxigênio (BOF) traduz-se em carregar no reator primeiramente a carga metálica (sucata e gusa, nesta ordem) e em seguida iniciar um

sopro de oxigênio de alta pressão através de uma lança, no decorrer deste processo são adicionados ao banho outras matérias-primas, por exemplo, fundentes e escorificantes, estes materiais darão origem a escória a qual irá reter na forma de óxidos as impurezas presentes no gusa e na sucata, sendo elas os elementos manganês, fósforo, enxofre, dentre outros. Simultaneamente o carbono presente no banho irá oxidar e formar gases CO e CO₂ que juntamente com particulados serão captados por um sistema de sucção e serão depositados através do sistema de despoeiramento (CHO, 1982 *apud* BORGES, 2016).

3.2 Princípios de Funcionamento do Alto-Forno

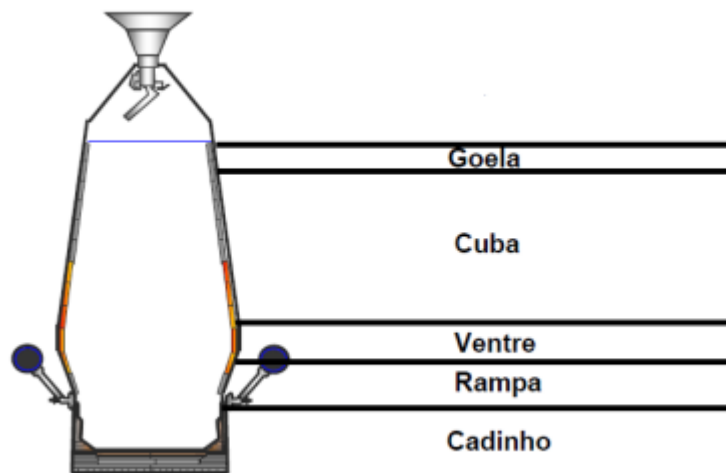
De acordo com Rizzo (2009), o ferro gusa, matéria-prima para a produção do aço através do processo BOF é depositado junto à escória no cadinho do alto-forno sendo separadas devido a diferença de densidade desses materiais. O alto-forno é um reator metalúrgico que por meio da fusão redutora, o minério de ferro é convertido a ferro metálico devido a presença de carvão vegetal ou coque, além de fundentes. Esses insumos são carregados no reator em seu topo na temperatura ambiente, em contracorrente com os gases ascendentes soprados nas ventaneiras no interior do alto-forno, gases esses que podem ser enriquecidos ou não com oxigênio e/ou combustíveis.

Para que o alto-forno possa ser operado com menor consumo de combustível, estabilidade operacional, alta produtividade, produzindo ferro-gusa com as propriedades exigidas pelo cliente, e provocar menor impacto possível ao meio ambiente é necessário que sejam satisfeitas três condições operacionais, as quais são: matérias-primas de qualidade, principalmente a carga metálica e o carvão, o reator também deve apresentar eficiente controle de fluxo gasoso interno e um bom esgotamento do cadinho (GEERDES *et al.*, 2015 *apud* RODRIGUES, 2020).

Segundo Mourão (2007), a estrutura externa do AF é constituída por diversas partes, sendo elas, a goela, a cuba, o ventre, a rampa e o cadinho, demonstrados na figura 3.2, definidos de acordo com sua função e geometrias. A goela fica localizada na parte superior do alto-forno e nela se encontra os equipamentos destinados a distribuir a carga dentro do reator, além de sensores utilizados para medir o nível do carregamento, o perfil da carga, a composição dos gases e a temperatura. A cuba é a parte do alto-forno que possui maior volume uma vez que devido ao aumento da temperatura o volume da carga também aumenta, por isso sua geometria possui formato de tronco - cônico proporcionando uma descida de carga suave e evitando a formação de cascões nas paredes do alto-forno.

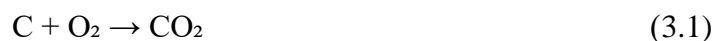
O ventre fica localizado entre a cuba e a rampa e deve suportar uma enorme variação de temperatura uma vez que sua posição está na zona coesiva, zona essa que compreende os pontos de amolecimento e fusão da carga metálica. Outra parte de fundamental importância no corpo do alto-forno é a rampa, que tem a finalidade de sustentar a carga e promover o gotejamento de gusa e escória no cadinho, devido a interstícios provocados pela presença de partículas de coque na região, sua geometria tem forma de tronco – cônico sendo que o diâmetro maior é situado na parte superior da região, e por final, e foco deste trabalho, o cadinho é uma região de formato cilíndrico localizado na parte inferior do alto-forno com objetivo de se conservar o gusa e a escória, dentro de um intervalo de tempo específico, pois periodicamente ele é perfurado no seu inferior em regiões que são denominadas furo de gusa, de onde é drenado o ferro-gusa em estado líquido juntamente com a escória. Na parte superior do cadinho é localizada as ventaneiras, por onde ar e combustíveis auxiliares são soprados no interior do reator metalúrgico (MOURÃO, 2007).

Figura 3.2: Estrutura externa do alto-forno



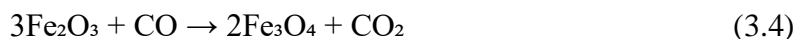
(VIANA, 2017)

De acordo com Silva (2011), dentro do alto-forno devido a presença de oxigênio já preaquecido injetado nas ventaneiras o carbono dos combustíveis, como exemplo, carvão vegetal e coque, reagem gerando calor intenso para o processo e gases, compostos por CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O e N₂. A aproximadamente 1 metro do nível das ventaneiras já não há mais oxigênio, e o gás formado será totalmente composto por CO₂ que em contato com o carbono forma o gás CO, de acordo com as reações 3.1, 3.2 e 3.3:





De acordo com Silva (2011), o gás em sentido ascendente (CO) reage com os óxidos de ferro no forno segundo a reação 3.4, reação 3.5 e reação 3.6:



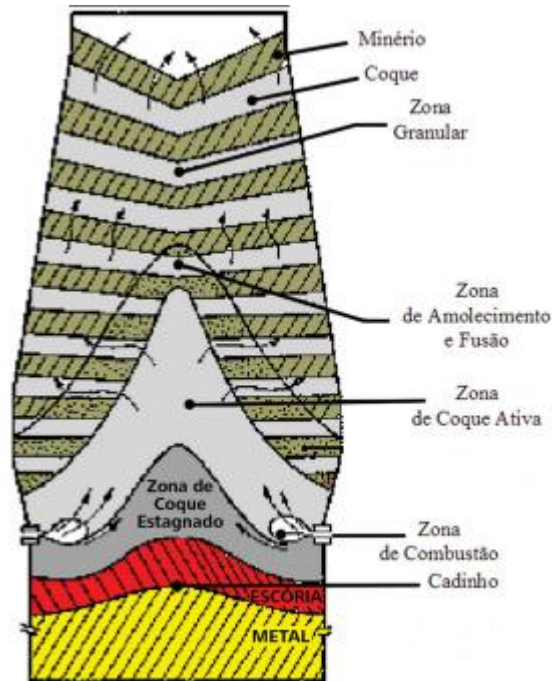
Em temperaturas superiores a 1070°C ocorre a redução dos óxidos de ferro através do carbono sólido, seguindo as reação 3.7, reação 3.8 e reação 3.9. A decomposição do calcário ocorre como demonstrada na reação 3.10 (SILVA, 2011).



A partir de experiências de dissecação de altos-fornos realizadas principalmente por russos e japoneses, foi possível gerar grandes avanços no conhecimento do estado interno deste reator. Com os resultados dessas experiências encontrou-se cinco zonas distintas dentro dos altos-fornos, que são, zona granular, zona de amolecimento e fusão ou zona coesiva, zona de coque ativo, zona de combustão e zona de coque estagnante (GANDRA, 2006).

Segundo Gandra (2006), a zona granular situa-se na parte superior do alto-forno e é constituída de cargas alternadas de coque e/ou carvão vegetal (combustível) e minério de ferro, sinter e/ou pelota (carga metálica). Na zona coesiva, também denominada de zona de amolecimento e fusão as camadas de carga metálica e combustível encontram-se semifundidas, na região da zona de coque-ativo escoam-se metal e escória em sentido descendente vindos da zona coesiva e em sentido ascendente os gases vindos da região das ventaneiras. A zona de combustão fica localizada em frente às ventaneiras e nela ocorre a queima do combustível com o ar quente injetado, e por fim, a zona de coque estagnante, também chamada de homem morto, é composta por uma coluna de coque, que fica em contato com o gusa líquido e escórias, no cadinho do reator, onde o combustível é consumido através da dissolução do carbono no ferro líquido lentamente. De acordo com a figura 3.3 pode-se observar a estrutura interna do alto-forno.

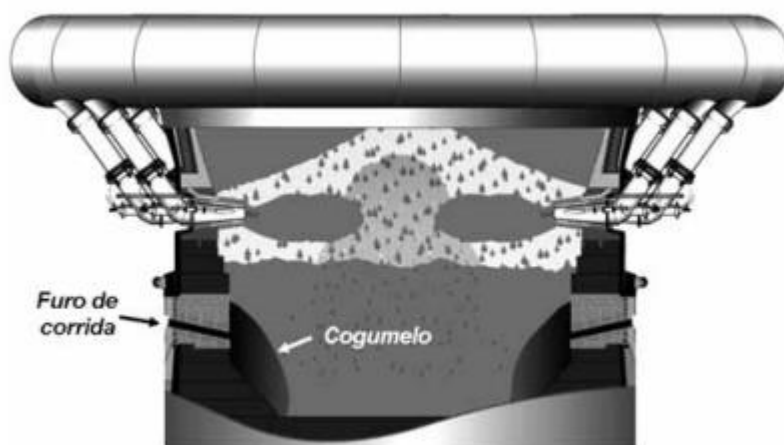
Figura 3.3 – Estrutura interna do alto-forno



(SILVA, 2011)

De acordo com Viana (2017), o gusa e a escória não se misturam, pois, a escória tem densidade mais baixa, $\rho = 2,3t/m^3$ e o gusa densidade de aproximadamente $\rho = 7,2t/m^3$. Na figura 3.4, está representado um cadinho de alto-forno com o furo de gusa, que é uma peça refratária, e na sua parte interna é criado o cogumelo, que é feito de massa refratária sinterizada responsável por tamponar o FG.

Figura 3.4: Cadinho de alto-forno

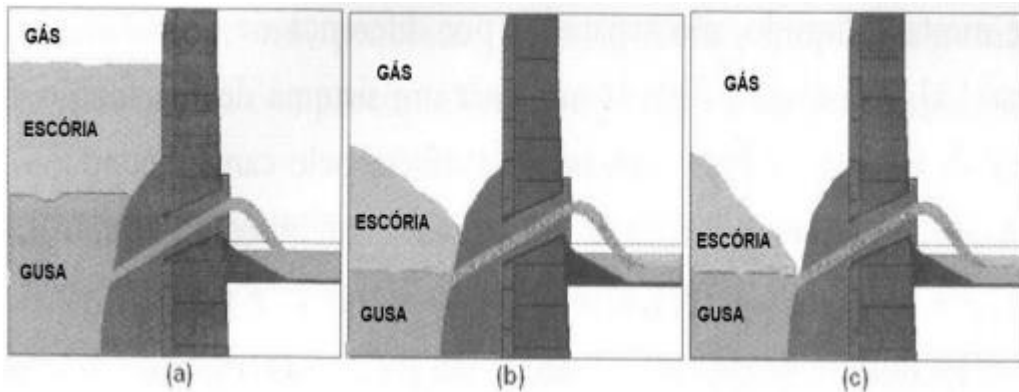


(RIBEIRO *et al.*, 2013)

O nível de líquidos no cadinho afeta todo o processo produtivo do AF, caso o nível esteja alto, afetará a descida da carga e se a escória atingir o nível das ventaneiras e não for

drenada poderá danificar o aparelho, através da queima da ventaneira, gerando furos e ou tamponando a entrada de ar, e demandar uma parada do reator para a realização de reparos no equipamento (VIANA, 2017). Na figura 3.5 está demonstrado a sequência de eventos que ocorre durante uma corrida do alto-forno.

Figura 3.5: Sequência de eventos durante uma corrida do alto-forno



(LELIS, ASSIS FILHO e FERREIRA, 2018)

No momento (a) tem-se o início da corrida e vazamento apenas de ferro gusa, em (b) o instante em que a escória começa a ser vazada e em (c), ambos os líquidos presentes no cadinho já foram vazados e o gás interno escapa para fora do forno gerando faíscas no furo de gusa indicando para o operador da casa de corridas que a corrida se encerrou e o furo deve ser imediatamente obturado.

3.3 O Comprimento do Furo de Gusa

É desejável sempre que possível manter o comprimento do furo de gusa o mais longo possível, para que seja possível drenar o líquido da parte mais interna do cadinho e diminuir o fluxo periférico ao longo da parede do cadinho. Caso o furo possua comprimento menor que o ideal a carga de calor sobre o revestimento refratário do cadinho aumenta, e conseqüentemente seu desgaste, e a vida útil do alto-forno se reduz (SANTOS, 2009).

A variação do comprimento do furo de gusa pode ser atribuída a capacidade que o canhão possui, a quantidade de massa injetada no furo e a qualidade da massa utilizada para tamponar o FG. Caso o furo seja longo demais, pode ocorrer de o equipamento de perfuração não conseguir abrir o FG e se torna necessário a utilização de lanças de oxigênio. O comprimento ideal para um furo de gusa depende do tamanho do alto-forno, do tamanho do

cadinho e do tamanho do cogumelo ideal para proteger o furo de gusa (GEYER e HALIFA, 2014).

Segundo Santos (2009), caso o furo de gusa esteja com o comprimento menor do que o desejado é necessário tomar algumas medidas no controle operacional do alto-forno que são:

- Melhorar a prática de fechamento do furo;
- Corrigir possíveis problemas nos equipamentos de tamponamento do FG;
- Melhorar a qualidade da massa de tamponamento;
- Redução do volume de sopro prioritariamente ao fechamento do furo de gusa;
- Fechamento das ventaneiras e/ou redução do diâmetro das mesmas sobre o FG;

Um fator importante para a manutenção do comprimento do furo de gusa, formação do cogumelo, e conseqüentemente a proteção da parede refratária do cadinho é a posição do homem-morto no cadinho. O homem morto é uma coluna de coque, logo um importante fator a se observar é o índice que mede a resistência do coque sob reação (CSR), quanto maior é a sua resistência mecânica e à reação, maior é o tamanho das partículas no homem morto, e com isso maior a fração de vazios e a permeabilidade do cadinho (SANTOS, 2005). O homem morto pode se encontrar em três posições distintas: flutuando completamente sobre os líquidos, flutuando parcialmente ou assentado no fundo do cadinho. Para que o comprimento do FG seja atingido é preciso que o homem morto esteja próximo ao furo e a sua base deve estar abaixo do nível do FG (ALVARES, 2019).

Segundo Huang *et al.* (2009), o homem morto tem formato cônico, está localizado no centro do cadinho e é possivelmente pouco impermeável aos líquidos (gusa e escória), pois principalmente ao centro do mesmo tem-se uma camada muito densa e pouco porosa de coque. Na figura 3.6 está registrado uma amostra do núcleo do homem morto obtida pelas ventaneiras de um alto-forno.

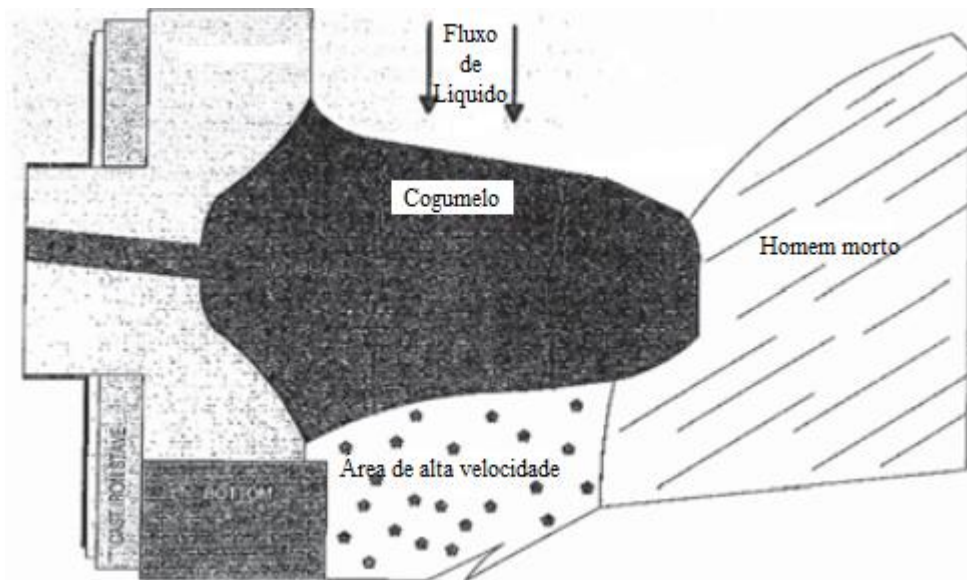
Figura 3.6: Amostra do núcleo do homem morto através das ventaneiras



(HUANG *et al.*, 2009)

O homem morto tem seu volume dividido em duas regiões: zona morta e zona de coque ativo. A zona morta é impermeável aos líquidos presentes no cadinho e fica localizada ao centro do homem morto. A zona de coque ativo pode ser permeável aos líquidos e a região externa ao homem morto é chamada de zona livre de partículas ou gap e é permeável ao fluxo de gusa e escória. A permeabilidade do homem morto afeta os fluxos dos líquidos presentes no cadinho e a transferência de calor na região (YAN *et al.*, 2005). Quando a permeabilidade do homem morto diminui os fluxos dos líquidos situados no cadinho tendem a ser periféricos, o que resulta na intensificação da erosão da parede do cadinho, especialmente na região abaixo do furo de gusa (SANTOS, 2009).

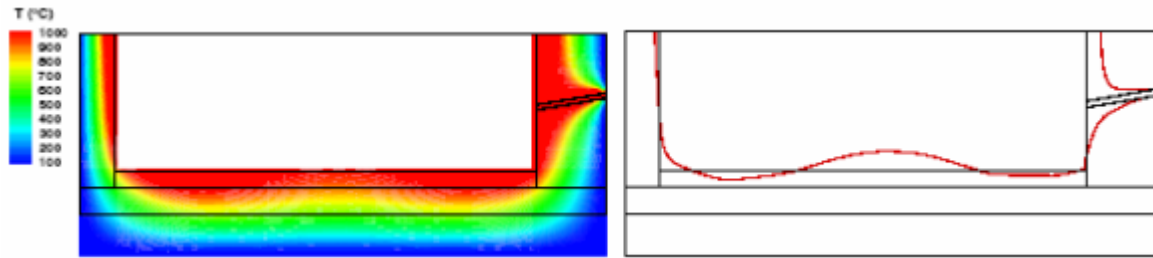
Figura 3.7: Fluxo de líquidos no cadinho



(NELSON e HUNDERMARK, 2016)

Um ponto importante a ser estudado é o desgaste na região do furo de gusa. De acordo com estudos de Yan *et al.* (2005), a distribuição de temperatura corresponde com a distribuição de velocidade do gusa. Na figura 3.8 tem se representado a distribuição de temperatura do gusa no cadinho do alto-forno e a distribuição de erosão na linha de 1150°C na região próxima ao FG provocada pelas altas velocidades do gusa e maiores temperaturas.

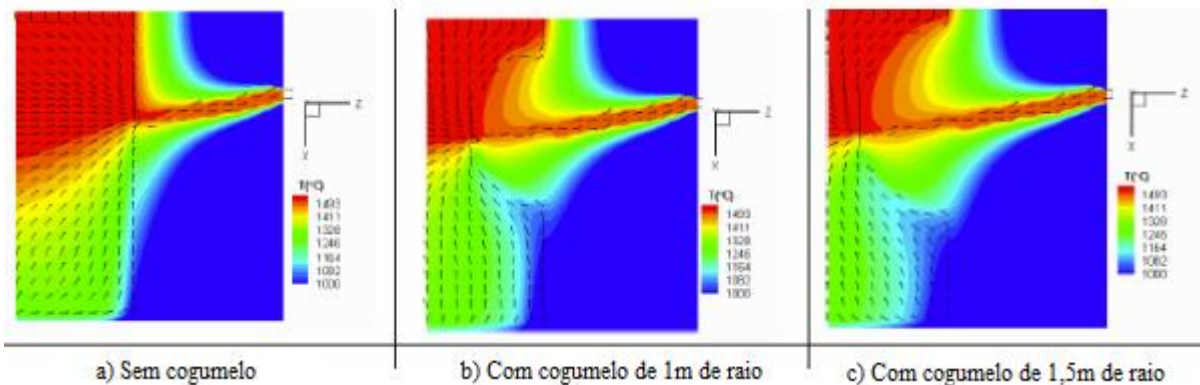
Figura 3.8: Contorno de temperatura e perfil de desgaste



(YAN *et al.*, 2005)

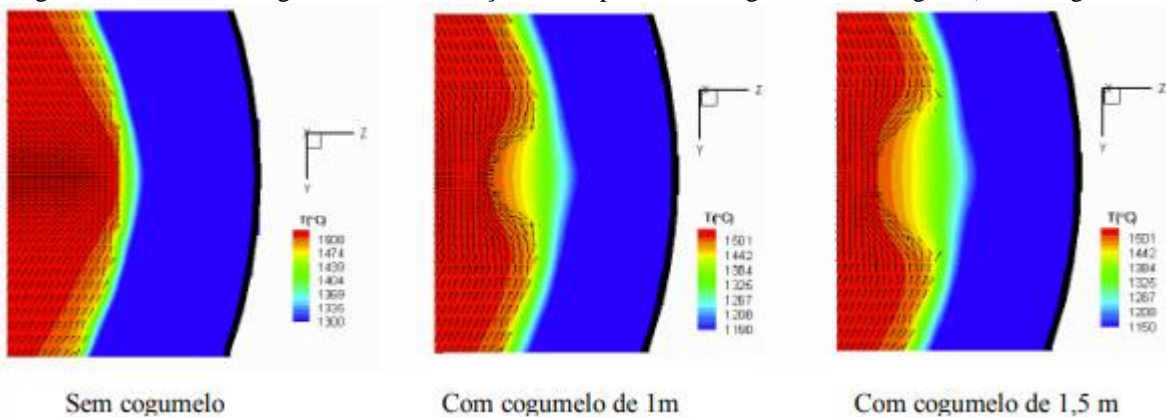
Zhou *et al.* (2005) fizeram estudos comparativos em relação a inexistência do cogumelo e a existência do cogumelo com 1,0m e 1,5m de raio. Nas figura 3.9 e figura 3.10 está representado o comportamento da temperatura do cadinho próximo ao furo de gusa em três diferentes situações: Sem cogumelo, com cogumelo de 1,0m de raio e com cogumelo de 1,5m de raio, e em dois cortes: corte transversal e corte longitudinal.

Figura 3.9: Efeito do cogumelo na distribuição de temperatura na região do furo de gusa (corte transversal)



(ZHOU *et al.*, 2005)

Figura 3.10: Efeito do cogumelo na distribuição de temperatura na região do furo de gusa (corte longitudinal)



(ZHOU *et al.*, 2005)

Percebe-se com o aumento do tamanho do cogumelo a velocidade periférica do fluxo de ferro gusa muda, se dirigindo para o centro do cadinho, o que diminui o desgaste dos refratários da parede do cadinho. Em relação a distribuição de temperaturas a existência de um

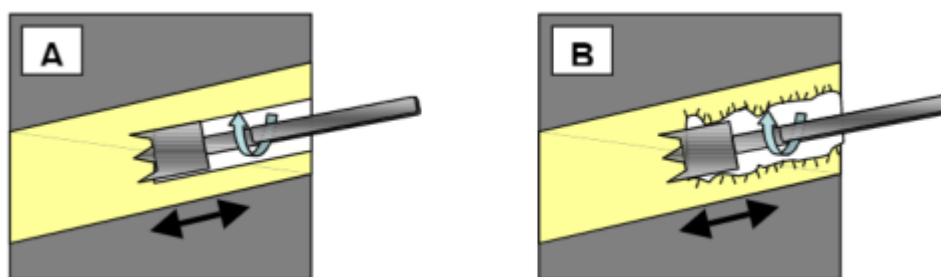
cogumelo maior proporcionou o afastamento das linhas de temperaturas maiores da carcaça do cadinho.

3.4 Perfuração do Furo de Gusa

Segundo Geerdes *et al.* (2015), existem dois métodos para a abertura do furo de gusa: abertura por perfuração (broca) e por cravamento de barra. A prática de cravamento de barra é adequada para altos-fornos com apenas um FG, essa prática consiste em colocar uma barra na massa de tamponamento, imediatamente após a obturação do furo e no momento de abertura, extraí-la. Sua vantagem é que a abertura se torna rápida, porém essa técnica gera grande impacto nos tijolos e blocos do furo de gusa. Muitas empresas utilizam a técnica da barra cravada, entretanto a maioria das siderúrgicas utilizam a técnica de abertura por perfuração utilizando brocas.

Conforme Andrade *et al.*, para uma perfuração adequada no momento de abertura do FG é necessário a combinação de quatro variáveis: tipo de broca e refrigeração usadas, velocidade (rpm) e força de giro da broca, velocidade (m/min) e força de avanço da broca e frequência e amplitude do martelo de impacto. Com a adequada combinação entre essas variáveis é possível obter uma superfície interna do FG isenta de trincas, caso contrário a broca exerce um trabalho mais agressivo no momento da abertura, podendo ocasionar trincas internas na massa de tamponamento como se pode observar na figura 3.6.

Figura 3.11: Situações de trabalho das brocas



(LELIS, ASSIS FILHO E FERREIRA, 2018)

Existem algumas características importantes que se deve observar, para avaliar se a perfuração teve boa qualidade que são: ausência de trincas no interior do FG, estabilidade do comprimento do FG, diâmetro final do furo igual ao diâmetro da broca escolhida, consumo de apenas uma ferramenta no momento da abertura, sem a necessidade de utilizar barras ou tubos

de oxigênio, tempo de abertura, bom esgotamento do cadinho, menor impacto possível na região do FG e manutenção do cogumelo (ANDRADE *et al.*).

3.5 Obturação do Furo de Gusa

O final da corrida é indicado pelo sopro de gás que escapa do alto-forno gerando faíscas na região do furo de gusa, uma vez que os níveis de gusa e escória se inclinam e atingem a saída do furo promovendo o deslocamento dos gases através dessa região. Em seguida o canhão de massa carregado é direcionado até a boca do furo e a massa é injetada no interior do mesmo a fim de vedar o FG. As vezes o canhão não está posicionado de forma adequada, deixando de vedar a região entre a boca do canhão e a boca do furo, o que pode resultar em derramamento de massa no canal de corrida, além de acarretar em desperdício, essa situação é perigosa, pois se faz necessário que o operador da área carregue novamente o canhão, enquanto as faíscas e os gases continuam sendo soprados para fora do furo, para evitar esse tipo de evento é necessário que verifique se a boca do FG se encontra moldada corretamente e se o canhão está alinhado corretamente e sem material obstruindo a passagem da massa antes do processo de perfuração (GEYER e HALIFA, 2014).

Conforme Geyer e Halifa (2014), depois que a massa é injetada no interior do furo é necessário que ela tenha tempo suficiente de sinterizar, e assim evitar o desgaste prematuro e garantir a vedação adequada do FG. Outro procedimento importante durante a campanha do furo de corrida é verificar se o canhão está operando corretamente, pois caso o pistão se encontre desgastado pode provocar o vazamento de massa pela parte traseira do equipamento e isso resultar em: má compactação, alto consumo de massa e risco de perda do comprimento do furo.

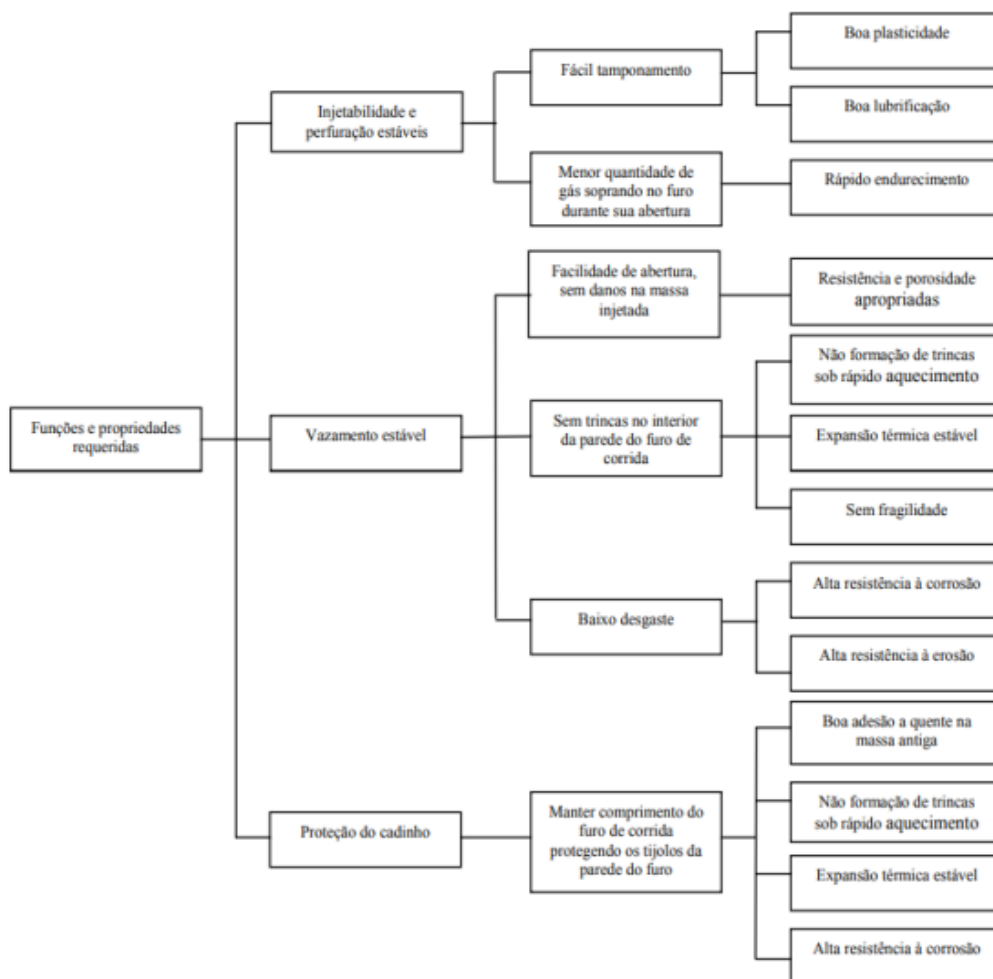
3.6 Massa de Tamponamento

A massa de tamponamento é um material de alta tecnologia e composto por inúmeras matérias-primas que possuem diferentes funções. Esse material sofre diversas transformações após sua fabricação, e com isso variação em suas propriedades, principalmente sua plasticidade. A massa deve suportar o calor e a pressão interna do alto-forno e não oferecer dificuldade no momento de abertura do furo. Diversas reações químicas ocorrem com o a finalidade de que a

massa preencha perfeitamente o FG, não forme porosidades e trincas, e com isso gusa e escória possam se depositar nesses poros e solidificar prejudicando o processo de abertura do furo, outro objetivo é que a massa que está sendo injetada possa aderir à massa remanescente, recompondo o cogumelo que foi desgastado durante a corrida e protegendo o cadinho (RIBEIRO *et al.*, 2013).

Segundo Lelis, Assis Filho e Ferreira (2018), esse produto requer muitos cuidados com relação a estocagem e transporte, quando a massa é removida do local onde é armazenada ela entra em contato com a temperatura e condições ambientes, logo depois é adicionada no canhão e injetada no FG onde fica exposta a alta temperatura e pressão, nesse momento o material responsável pela sua plasticidade é eliminado ocasionando a sinterização dessa massa. É necessário que a massa fique estocada entre cinco a dez dias, o que é chamado de tempo de envelhecimento, com o objetivo de melhorar sua molhabilidade/encharcamento e atingir o ponto ideal de plasticidade e uniformidade para injeção no FG. Na figura 3.7 está esquematizado as funções e propriedades requeridas das massas de tamponamento.

Figura 3.12: Funções e propriedades requeridas das massas de tamponamento



(RIBEIRO *et al.*, 2013)

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa deu-se de acordo com as seguintes etapas:

- a) Escolha do alto-forno;
- b) Avaliação dos parâmetros operacionais do alto-forno;
- c) Análise dos fenômenos;
- d) Plano de ação;

4.1 Escolha do Alto-forno

Considerando que uma maior produtividade do forno implica em maior controle do esgotamento do cadinho, e com isso, maior controle do comprimento do furo de gusa, logo optou-se por usar dados de um alto-forno de grande porte para realizar a pesquisa e as duas massas de tamponamento que são utilizadas nesse reator. Além disso, esse forno possui bom nível de instrumentação, o que facilita a validação dos resultados obtidos.

4.2 Avaliação dos Parâmetros Operacionais do Alto-forno

Tomando como base relatórios diários de operação e os dados registrados por corrida, juntamente com o que é encontrado na literatura e as informações de especialistas do alto-forno em questão, foram analisados os dados utilizando o programa Microsoft Excel, referentes ao período de abril de 2021 até junho de 2022. Os seguintes parâmetros foram analisados:

- Média do comprimento do furo de gusa (milímetros);
- Desvio padrão do comprimento do furo de gusa (milímetros);
- Média de tempo de corrida (minutos);
- Média de desvio de injeção de massa (kg);
- Média de pressão de injeção;
- Tempo de forno fechado (minutos);
- Média de índice de escória;

- Porcentagem de corridas abertas dentro do intervalo previsto;
- Produção de ferro gusa por dia (toneladas);
- Número de trincas;
- Número de reparos de boca;
- Índice de extrusão das massas de tamponamento;
- Número de arrombamentos;
- Número de corridas com acerto de comprimento do FG;
- Número de retorno de massa;
- Número de corridas obturadas sem sopro;

4.3 Análise dos Fenômenos

Os parâmetros analisados de acordo com as explicações abaixo:

4.3.1 Média do comprimento do furo de gusa

O comprimento do furo de gusa registrado pelos operados a cada corrida foi utilizado para o cálculo da média do comprimento por dia e também a média do comprimento por mês. Foi descrita séries temporais durante todo o período estudado, além de ser utilizado para algumas análises de correlação com outras variáveis para observar seu impacto nesses parâmetros e quais parâmetros o impactam.

4.3.2 Desvio padrão do comprimento do furo de gusa

O desvio padrão populacional do comprimento do furo de gusa foi calculado de acordo com os dados disponibilizados do comprimento do FG por corrida, e quanto menor esse desvio, significa que o processo operacional durante o período foi mais estável o que é benéfico para a produtividade do alto-forno.

4.3.3 Média de tempo de corrida

A média do tempo de corrida foi calculada de acordo com os relatos por corrida do período de abril de 2021 à junho de 2022, esses dados foram utilizados para a comparação do

tempo de corrida para as duas massas de tamponamento utilizadas na obturação dos furos, se espera que quanto maior é o comprimento do furo de gusa maior o tempo de corrida uma vez que com isso é possível se alcançar regiões mais profundas do cadinho e logo mais material deverá ser vazado exigindo maior tempo.

4.3.4 Média de desvio de injeção de massa

O desvio de injeção de massa é calculado como a subtração entre a quantidade de massa injetada no momento da obturação (Q^f) e a quantidade de massa prevista para ser injetada no momento da obturação do FG (Q^0). A quantidade de massa prevista para ser injetada no momento da obturação do furo de gusa é calculada de acordo com o comprimento registrado na abertura do FG (l), como está definido nas equações 4.1, 4.2 e 4.3.

Se $l < 2999mm$

$$Q^0 = 6,5 * 67kg \text{ de massa} \quad (4.1)$$

Se $l < 3301mm$

$$Q^0 = 4,5 * 67kg \text{ de massa} \quad (4.2)$$

Se $l > 3301mm$

$$Q^0 = 2 * 67kg \text{ de massa} \quad (4.3)$$

Logo, o cálculo do desvio de massa pode ser expressão segundo a equação 4.4.

$$\text{Desvio de injeção de massa} = Q^f - Q^0 \quad (4.4)$$

Sabe-se também, que no cotidiano, o processo de obturação de furo de gusa, possui certa variação, logo se faz necessário estimar um intervalo de valores onde o desvio de injeção de massa está dentro do tolerável, para o alto-forno em questão, quando o desvio de massa está entre um superavit de 40kg ou déficit de 40kg, ainda assim, esse desvio é considerável aceito dentro da quantidade de massa prevista para ser injetada no momento da obturação do FG.

4.3.5 Média de pressão de injeção

A média de pressão de injeção de massa está relacionada a capacidade do canhão utilizado na obturação do furo comprimir a massa utilizada no tamponamento e esse parâmetro

foi utilizado para se comparar as duas massas aplicadas na obturação dos FG do alto-forno estudado, quando menor é a pressão de injeção mais fácil é a manipulação da massa na obturação.

4.3.6 Tempo de forno fechado

Esse parâmetro foi analisado de acordo com dados disponibilizados por corrida sendo utilizado para comparar as duas massas de tamponamentos empregadas na obturação dos furos e o impacto que o comprimento do furo provoca no mesmo, quanto menor esse parâmetro significa que o processo foi mais estável e quanto maior é esse tempo menor é produtividade do alto-forno uma vez que ele está produzindo gusa, porém o cadinho não está sendo esgotado.

4.3.7 Média de índice de escória

O índice de escória é calculado pela divisão entre o período que a escória começa a ser vazada do cadinho através do furo de gusa pelo tempo total da corrida, na presente pesquisa o parâmetro analisado foi a média por mês. Quanto maior é esse índice significa que a escória foi vazada por mais tempo e com isso em maior volume, logo o esgotamento do cadinho mais foi eficiente. Esse parâmetro foi analisado em relação às duas massas de tamponamento utilizadas no reator e também foi observado a correlação entre o índice e o comprimento do furo de gusa.

4.3.8 Porcentagem de corrida aberta dentro do intervalo previsto

No alto-forno em questão um furo de gusa é aberto sempre de acordo com o tempo exigido pelo especialista, para que o processo de esgotamento seja suficiente para suportar a produção do forno enquanto o gusa e a escória são vazados. O tempo varia de acordo com a situação operacional do alto-forno e é considerado dentro do intervalo previsto corridas abertas entre onze minutos antes do especificado ou onze minutos posteriores ao exigido. Esse parâmetro foi utilizado para comparar as duas massas aplicadas no momento da obturação quanto o maior essa porcentagem melhor é o desempenho da massa.

4.3.9 Produção de ferro gusa

É o principal parâmetro observado, pois o objetivo é maximizá-lo, esses dados foram disponibilizados de acordo com relatórios diários de operação e comparados com a média por dia do comprimento do furo de gusa para entender o impacto do comprimento na produtividade do reator.

4.3.10 Número de trincas

O número é disponibilizado nos relatórios por corrida, na pesquisa esse parâmetro foi utilizado para comparar a qualidade das massas de tamponamento utilizadas, quanto maior esse parâmetro pior é a qualidade da massa especificada, pois isso indica que o processo de abertura não foi eficiente.

4.3.11 Número de reparos de boca

Assim como o número de trincas o número de reparos de boca também foi utilizado para se comparar a qualidade das massas de tamponamento, e quanto maior esse índice menor é a qualidade da massa, pois demanda mão de obra do operador para fazer esse reparo, e caso ele seja necessário durante o sopro do gás de alto-forno pelo FG no momento de obturação maior é o risco da operação deixando a segurança do operador em risco e ainda emitindo partículas que escapam do interior do reator para a atmosfera.

4.3.12 Índice de extrusão das massas de tamponamento

O índice de extrusão foi utilizado para comparar a qualidade das massas de tamponamento utilizadas na obturação dos furos. Para isso foi calculada a média de todo o período analisado para cada tipo de massa.

4.3.13 Número de arrombamentos

Foi contabilizado o número de arrombamentos de furo de gusa durante o período para cada massa de tamponamento utilizada e quanto maior é esse índice menor é a qualidade da massa, pois essa ocorrência resultou em instabilidade operacional na área de corrida do alto-forno.

4.3.14 Número de corridas abertas com acerto do comprimento

O processo de obturação do FG como já dito anteriormente possui certa variação o que resulta em instabilidade no processo operacional por esse motivo faz se necessário estabelecer parâmetros máximos e mínimos para o comprimento dos furos. No presente estudo foi estabelecido como limite máximo para o comprimento do FG sendo 3500 milímetros e como limite inferior 3100 milímetros. Este parâmetro foi utilizado para comparar a eficiência das massas de tamponamento utilizadas.

4.3.15 Número de retornos de massa

O número de retorno de massa foi contabilizado com o intuito de avaliar as duas massas utilizadas no processo, quanto maior esse valor menor é a qualidade da massa.

4.3.16 Número de corridas obturadas sem sopro

Assim como no parâmetro citado anteriormente, este também foi utilizado para se comparara a qualidade da massa empregada na obturação do furo de gusa, e quanto maior é o valor desse parâmetros menor é a qualidade da massa e mais será exigido do canhão no momento da obturação, pois será necessário que ele direcione gusa e escória para o interior do cadinho enquanto em operações com sopro seria necessário ele obstruir apenas a vazão de gás.

4.4 Plano de Ação

De acordo com relato do especialista da área de corrida do alto-forno estudado, as massas utilizadas na obturação do furo de gusa de ambos os fornecedores não possuem um processo padrão para o cálculo do índice de extrusão da massa. Por esse motivo uma sugestão de plano de ação é a padronização dos testes realizados pelos fabricantes de acordo com a norma ABNT NBR 9881 – Determinação da pressão e da velocidade de extrusão de massas para tamponamento de furo de gusa. Realizando os testes das massas de acordo com a norma sugerida, o fabricante proporcionará maior segurança e qualidade em relação aos produtos, e de acordo com essa base aferir qual índice é o mais eficiente para o alto-forno em questão.

Outra sugestão feita pelo especialista da área foi a alteração do padrão de injeção de massa no momento da obturação do furo de gusa. De acordo com a tabela 4.1 é possível observar como era o padrão de injeção de massa antes da alteração.

Tabela 4.1: Padrão de injeção de massa antigo

Comprimento FG (mm)	Massa	Estágios injeção	Post pressing (30s)	QUANTIDADE (kg)
Menor ou igual a 2700mm	5 traços	3 Estágios (2 traços - 2 traços - 1 traço)	Máximo 1 traço	402
Entre 2800 -- 3000mm	4 traços	2 Estágios (2 traços - 2 traços)	Máximo 1 traço	335
Entre 3100 -- 3300mm	3,5 traços	2 Estágios (2 traços - 1,5 traços)	Máximo 1 traço	301,5
Maior ou igual a 3400mm	2 traços	2 Estágios (1 traço - 1 traço)	Máximo 0,5 traço	167,5

Fonte: Autor

Observando a tabela 4.1 o processo de injeção de massa poderia ser realizado de quatro formas distintas, de acordo com o comprimento do furo de gusa. Cada traço citado corresponde a 67 kg de massa e cada estágio representa um intervalo de tempo entre a injeção da quantidade de traços especificados, durante os estágios o canhão permanece na boca do FG e a massa inicia o processo de sinterização. Na tabela 4.2 está representado o padrão de injeção de massa de tamponamento de acordo com a alteração sugerida pelo especialista da área de corrida do alto-forno estudado.

Tabela 4.2: Padrão de injeção de massa novo

Comprimento FG (mm)	Massa	Estágios injeção	Post pressing (30s)	QUANTIDADE (kg)
Menor ou igual a 3100mm	5 traços	2 Estágios (4 traços - 1 traços)	Máximo 0,5 traço	368,5
3101 -- 3300mm	4 traços	2 Estágios (3 traços - 1 traços)	Máximo 0,5 traço	301,5
Maior do que 3301mm	2 traços	2 Estágios (1 traço - 1 traço)	Máximo 0,5 traço	167,5

Fonte: Autor

No novo padrão estabelecido existe apenas três formas de obturação do furo de acordo com seu comprimento e a quantidade de traços de massa no primeiro estágio é maior do que se comparado à tabela anterior. O esperado é que com esse novo padrão a média do comprimento do furo de gusa seja maior que a média do comprimento do furo de gusa do padrão anterior, pois uma quantidade maior de massa é injetada no primeiro estágio, e com isso menor será a dificuldade para se injetar no segundo estágio, lembrando que a maior parte da massa necessária para o tamponamento já foi injetada no FG e iniciou seu processo de sinterização.

5 RESULTADOS

De acordo com a figura 5.1, é possível observar através da série temporal do período estudado o comportamento das variáveis, média de desvio de massa por dia e média do comprimento do furo de gusa por dia.

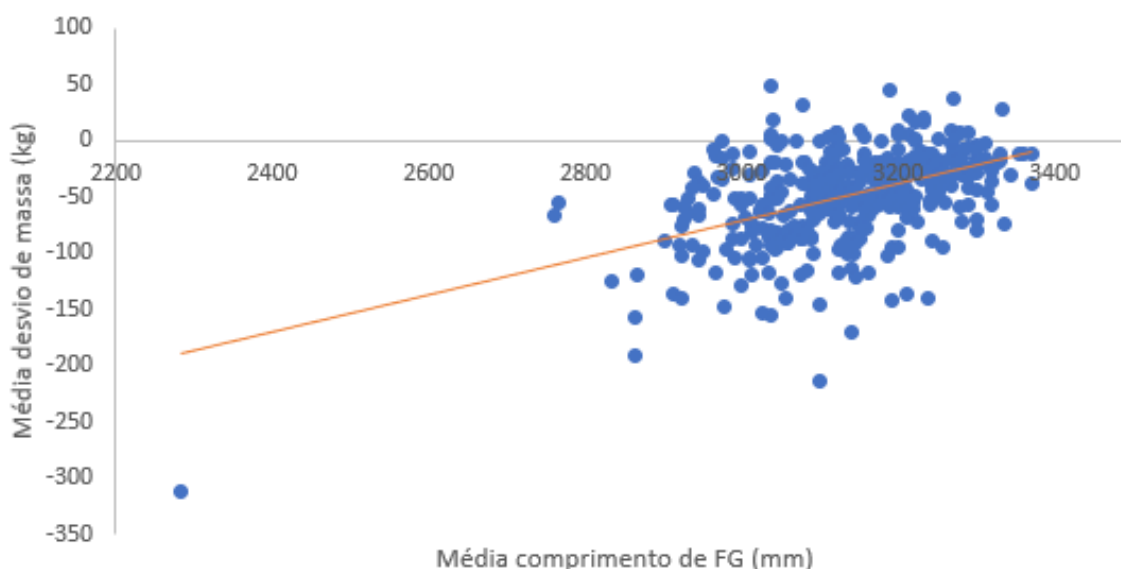
Figura 5.1: Série temporal da média de desvio de massa por dia e média de comprimento de furo de gusa por dia



Fonte: Autor

Como era esperado, de acordo com o que foi encontrado nas pesquisas de Geyer e Halifa (2014), observa-se na figura 5.1 que quando ocorre períodos de tempo em que o déficit de massa está fora do intervalo considerado ideal o comprimento do furo de gusa diminui proporcionalmente, ou seja, para uma boa estabilidade do comprimento é necessário que a quantidade de injeção de massa seja feita de acordo com os padrões operacionais. Na Figura 5.2 está a correlação entre média de desvio de massa por dia e média de comprimento do furo de gusa por dia, assim como a linha de tendência do comportamento entre estas variáveis.

Figura 5.2: Correlação da média de desvio de massa por dia e média de comprimento do furo de gusa por dia

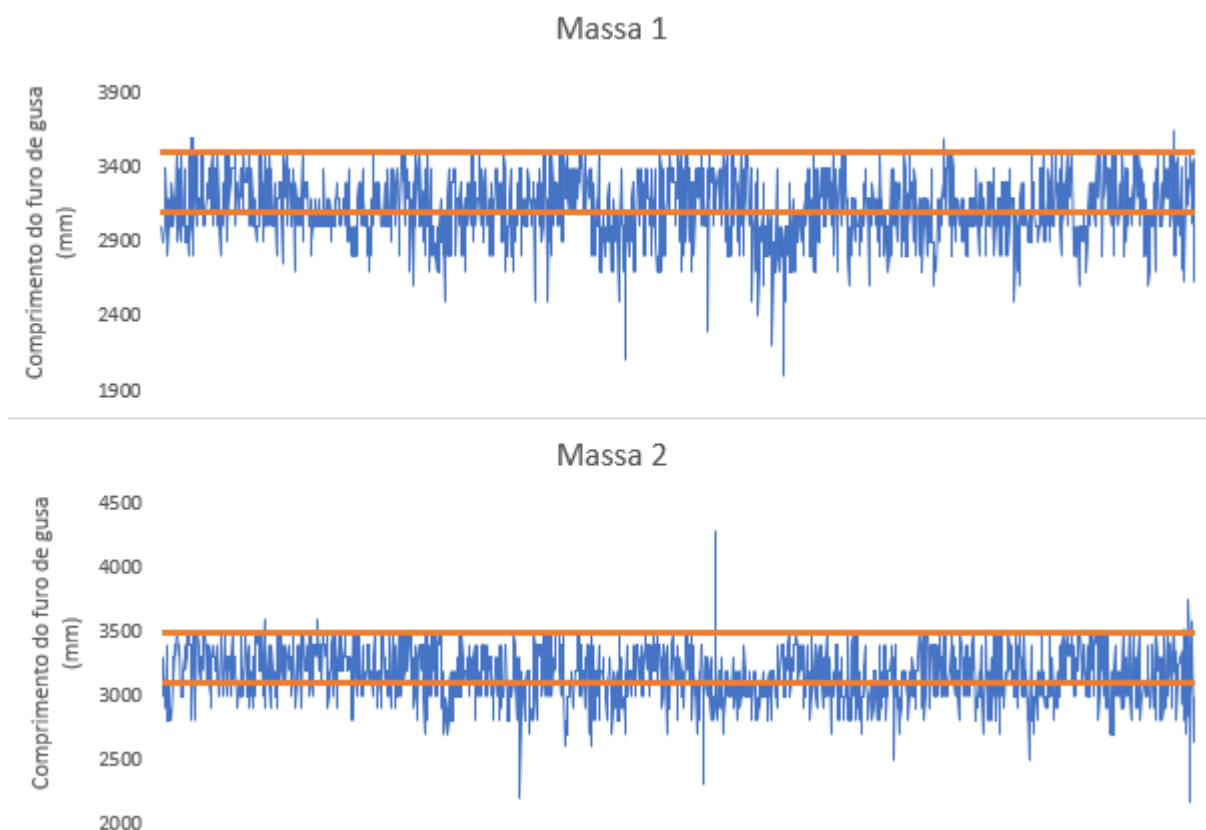


Fonte: Autor

Um dos fatores que interferem na variação do comprimento do FG é a quantidade de massa injetada no momento da obturação (GEYER e HALIFA, 2014), logo, o desvio de massa se correlaciona com o comprimento do furo de gusa. Para evitar os efeitos negativos que a variação do comprimento do FG possa ocasionar ao processo, é necessário melhorar a eficiência do cálculo de massa previsto para se obturar o furo, com o intuito de estabilizar o comprimento do FG, aumentar a eficiência do esgotamento do alto-forno, a produtividade do reator e proteger o revestimento refratário do cadinho prolongando a vida útil do reator.

Ainda de acordo com os estudos realizados por Geyer e Halifa (2014), outro fator que interfere no comprimento do furo de gusa é a qualidade da massa empregada no momento da obturação do furo. O alto-forno estudado utiliza em suas operações de obturação, duas massas de tamponamento de diferentes fornecedores, que não serão citados para preservar o sigilo dos mesmos, na pesquisa foi analisado os dados referentes a essas massas de acordo com relatórios por corrida dos operadores da área de corrida do alto-forno e os dados disponibilizados pelos fornecedores das massas. Na figura 5.3 está a série temporal do comprimento do furo de gusa para as duas massas utilizadas no processo de obturação do alto-forno.

Figura 5.3: Série temporal do comprimento do furo de gusa para as duas massa de tamponamento utilizadas



Fonte: Autor

Para os cálculos apresentados a seguir foi utilizado o programa Microsoft Excel. Na tabela 5.1 está apresentado a média de comprimento do FG por corrida e o desvio padrão do comprimento do furo de gusa para as duas massas utilizadas no alto-forno.

Tabela 5.1: Média de comprimento do furo de gusa e desvio padrão por tipo de massa de tamponamento

Parâmetro	Massa 1	Massa 2
Média de comprimento do FG (mm)	3123	3165
Desvio padrão da média do comprimento do FG (mm)	216,47	214,92

Fonte: Autor

Observando a tabela 5.1, percebe-se que nos furos de gusa em que foi utilizado no processo de obturação a massa 2, se teve maior média de comprimento de furo de gusa, que segundo as pesquisas realizadas por Zhou *et al.* (2005), diminui a degradação das paredes refratárias do cadinho, aumentando o período de campanha do alto-forno. A massa 2 ainda apresentou menor desvio padrão em relação à média do comprimento do FG, logo, a massa 2 proporciona maior estabilidade do comprimento, o que é benéfico para o processo. Na tabela

5.2, está registrado o resultado dos cálculos do desempenho das massas de tamponamentos utilizadas no processo de obturação dos furos de acordo com os registros disponibilizados.

Tabela 5.2: Desempenho das massas de tamponamento

Parâmetro	Massa 1	Massa 2
Média de desvio de massa por corrida (kg)	-62	-32
Média de tempo de corrida (min)	172	172
Índice de escória	0,91	0,91
Média de pressão de injeção por corrida	239	232
Porcentagem de abertura dentro do intervalo	69%	67%
Tempo de forno fechado (minutos)	1615	1607
Porcentagem de acerto de comprimento do FG	54%	56%
Porcentagem de trinca	2,48%	3,62%
Porcentagem de reparo de boca	6,19%	5,46%
Porcentagem de retorno de massa	5,93%	5,22%
Porcentagem de corrida sem sopro	7,46%	6,06%
Porcentagem de arrombamento	0,42%	0,35
Média de índice de extrusão por corrida	14,81	31,91

Fonte: Autor

As massas duas massas de tamponamento foram avaliadas de acordo com 13 (treze) parâmetros, e em 9 (nove) desses parâmetros a massa 2 teve desempenho superior a massa 1, quais são:

- Média de desvio de massa por corrida (kg);
- Média de pressão de injeção por corrida;
- Tempo de forno fechado;
- Porcentagem de acerto de comprimento do furo de gusa;
- Porcentagem de reparo de boca;
- Porcentagem de retorno de massa;
- Porcentagem de corrida sem sopro;
- Porcentagem de arrombamento;
- Média de índice de extrusão por corrida;

Em 2 (dois) desses parâmetros as massas apresentaram os mesmos resultados, sendo os seguintes:

- Média de tempo de corrida (min);
- Índice de escória;

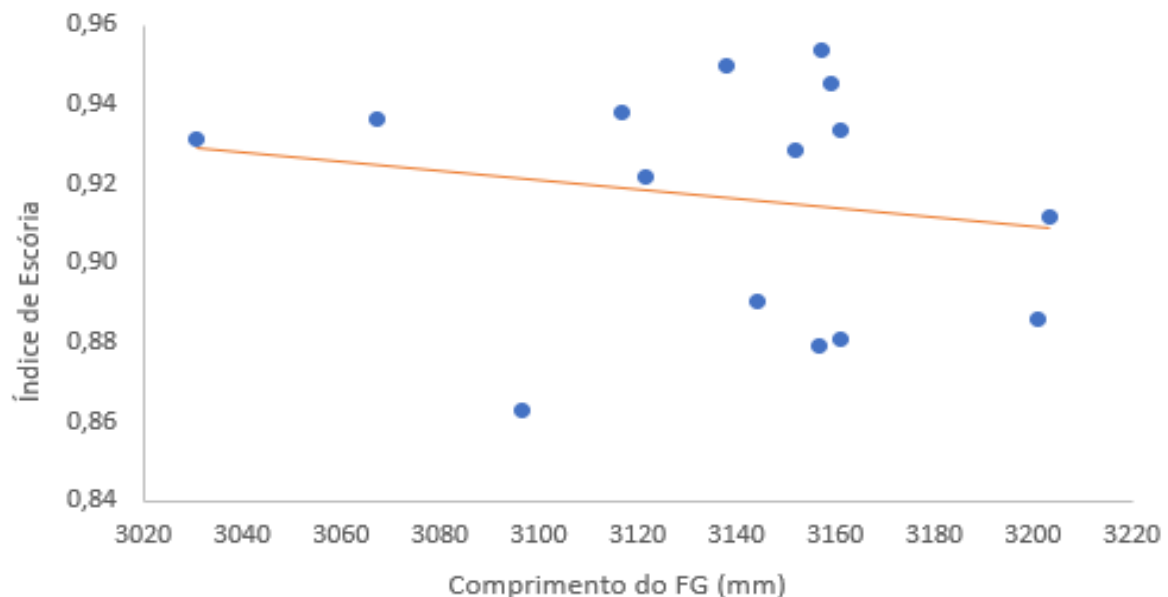
Em 2 dois (dois) a massa 1 apresentou melhor desempenho comparado com a massa 2, que foram:

- Porcentagem de corridas abertas dentro do intervalo;
- Porcentagem de trinca;

Observando o desempenho das massas estudadas de acordo com os parâmetros analisados recomenda-se sempre que possível a utilização da massa 2 para os processos de obturação dos furos de gusa, uma vez que ela se saiu melhor na maior parte dos parâmetros.

De acordo com Santos (2009), o comprimento do furo de gusa mais longo proporciona drenar líquidos de partes mais internas do cadinho. Sabendo que o gusa líquido fica situado na parte inferior do cadinho e a escória na parte superior ao gusa devido sua diferença de densidade (VIANA, 2017), foi realizado os cálculos de média de índice de escória por mês e média do comprimento do furo de gusa por mês, a figura 5.4 apresenta o gráfico da correlação entre essas variáveis e a linha de tendência do comportamento entre elas.

Figura 5.4: Correlação entre média do índice de escória e média do comprimento do furo de gusa por mês



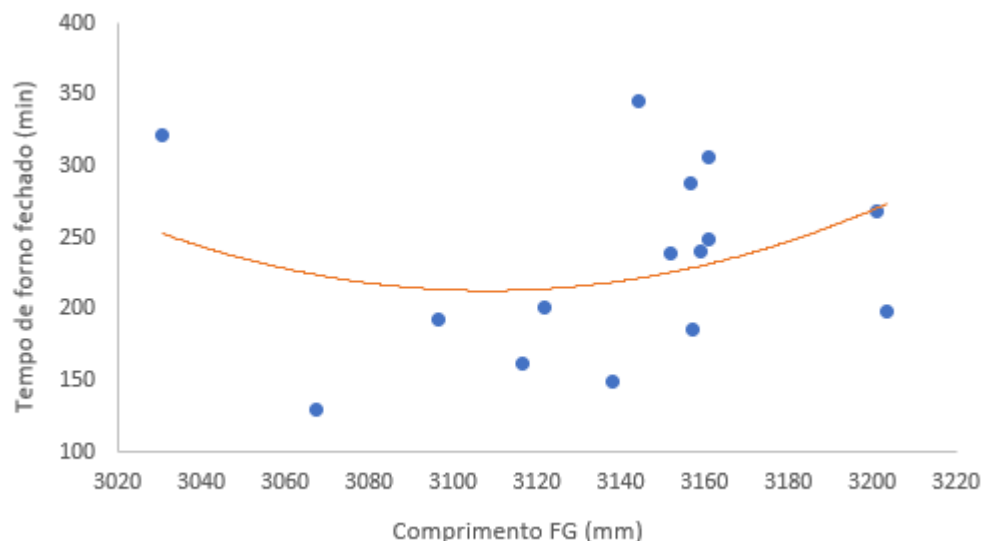
Fonte: Autor

Percebe-se analisando a linha de tendência do comportamento da correlação que quanto maior é o comprimento do furo de gusa, menor é o índice de escória, o que era de se esperar, pois com o comprimento do FG maior regiões mais profundas do cadinho são esgotadas e com isso maior é o volume de gusa a ser vazado antes que o nível da escória atinja o furo, e comece a ser esgotada, porém para que esse efeito seja reduzido uma técnica a ser empregada é o

aumento do diâmetro da broca utilizada na perfuração do furo o que irá aumentar a vazão dos materiais que estão depositados no cadinho. Outro fator importante que pode auxiliar a aumentar esse índice é melhorar a qualidade do coque, pois isso resultará em um cadinho mais permeável e com isso melhor será o fluxo de materiais durante a corrida.

Segundo Geyer e Halifa (2014), caso o comprimento do furo de gusa esteja longo demais pode ocorrer de o equipamento de perfuração não conseguir abrir o furo e se torna necessário a utilização de lanças de oxigênio, resultando em tempo de forno fechado. Caso o furo tenha comprimento menor que o ideal o aporte de calor na região do furo de corrida é maior de acordo com Zhou *et al.* (2005), o que resulta na formação de trincas devido as altas temperaturas, prejudicando o processo de abertura e resultando também em forno fechado. Na figura 5.5 está a correlação da média do comprimento do FG e o tempo de forno fechado por mês e a curva de tendência de comportamento entre essas variáveis.

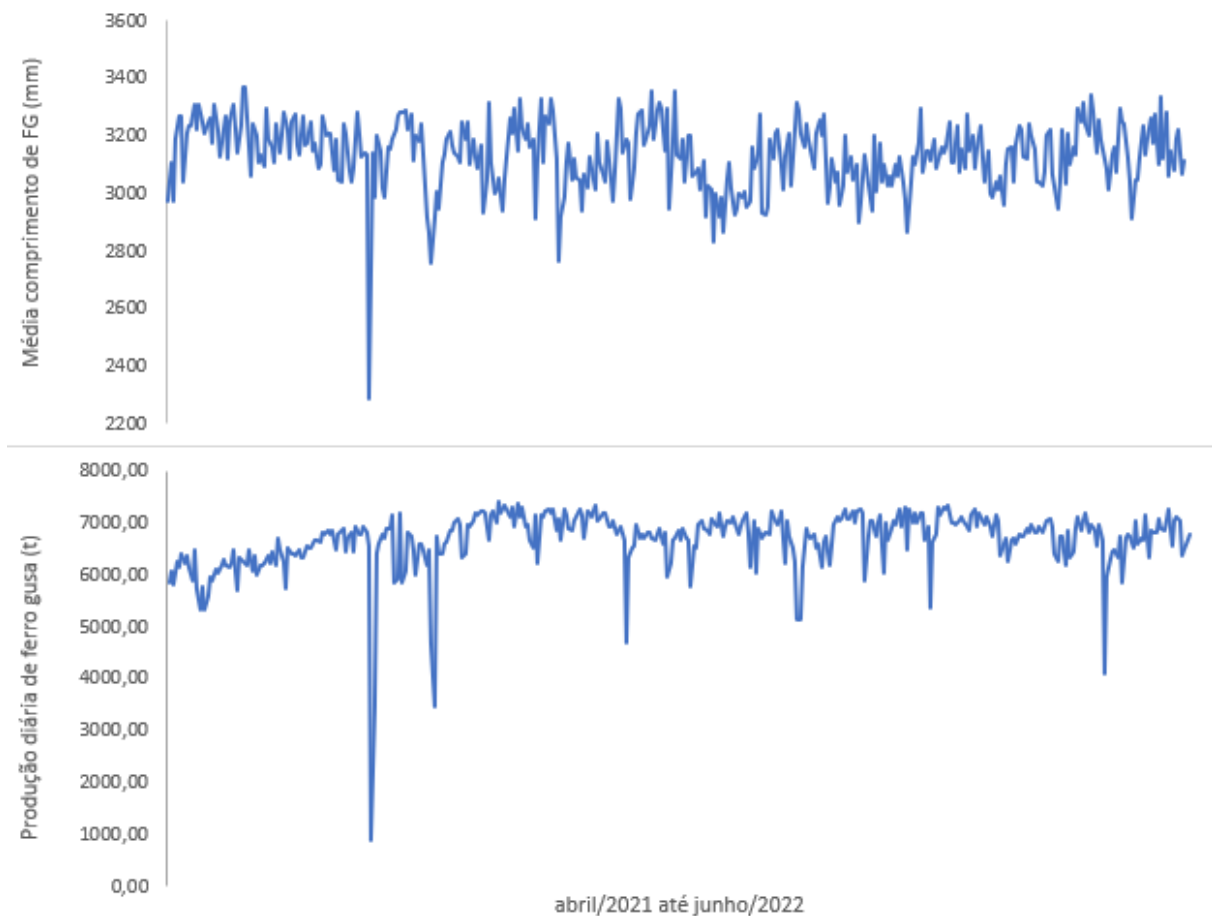
Figura 5.5: Correlação da média do comprimento do furo de gusa e o tempo de forno de forno fechado por mês



Fonte: Autor

Para que o alto-forno possa ser operado com alta produtividade é necessário que sejam satisfeitas três condições operacionais, as quais são: matérias-primas de qualidade, eficiente controle de fluxo gasoso interno e um bom esgotamento do cadinho (GEERDES *et al.*, 2015 apud RODRIGUES, 2020). Um dos principais parâmetros para um bom esgotamento do cadinho é o comprimento do furo de gusa. Na figura 5.6 está a série temporal da média do comprimento do furo de gusa por dia sobreposta a série temporal da produção diária de gusa do período de abril de 2021 até junho de 2022.

Figura 5.6: Série temporal da média do comprimento do furo de gusa por dia e produção diária



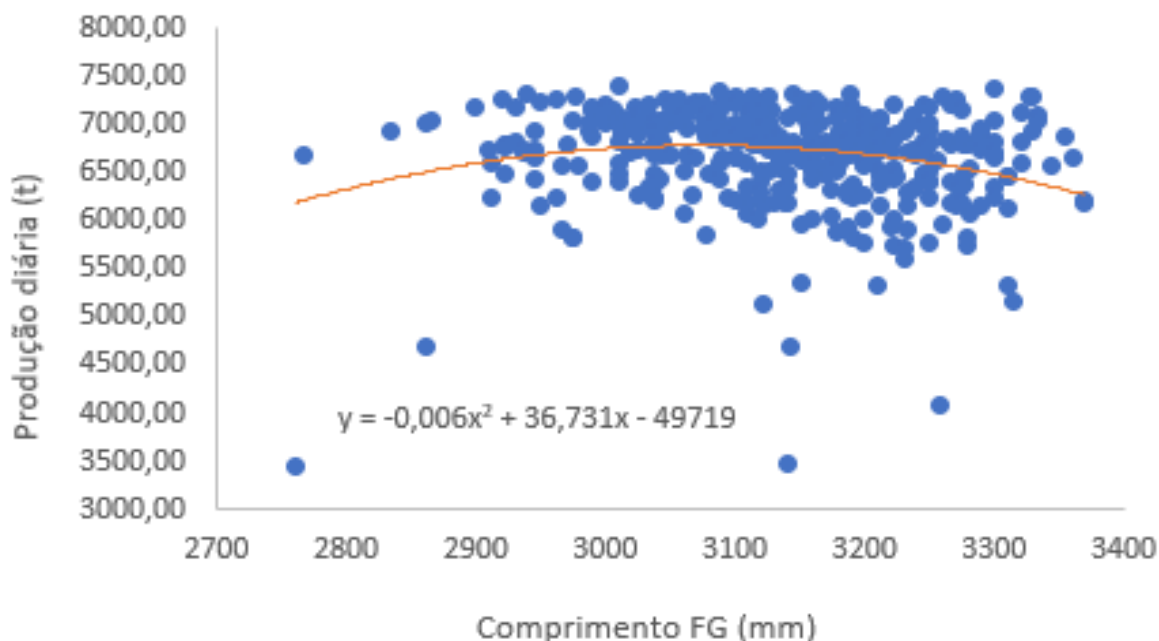
Fonte: Autor

Com o intuito de analisar a correlação entre a produção de ferro gusa e o comprimento do furo, foi feita a correlação entre essas variáveis, na figura 5.7 está descrita essa correlação, a curva de tendência de comportamento para as mesmas e a equação que descreve a curva. Observando a figura 5.7 percebe-se que a curva de tendência esboça uma parábola com concavidade voltada para baixo, ou seja, existe um ponto em que o comprimento médio do furo de gusa por dia alcança maior produtividade para o alto-forno. Para calcular este comprimento foi utilizado o software Microsoft Office Excel que gerou a equação da curva através de um polinômio do segundo grau, como está descrito na figura 5.7, derivando essa equação e igualando a zero foi encontrado o comprimento de:

$$l = 3060mm$$

Ou seja, de acordo com os resultados da presente pesquisa quanto mais próximo o comprimento do furo de gusa estiver de 3060 milímetros maior será a produtividade do reator.

Figura 5.7: Correlação entre a média de comprimento do furo de gusa e a produção de ferro gusa por dia



Fonte: Autor

Para verificar se a mudança no padrão de injeção de massa na obturação do furo de gusa foi eficiente foi analisado a média do comprimento do furo de gusa e o desvio padrão do comprimento para cada furo de gusa do período anterior à mudança de primeiro de janeiro de 2022 à dezoito de julho de 2022 e posterior a mudança de dezoito de julho de 2022 à cinco de setembro de 2022. Na tabela 5.3 está representado o resultado das análises.

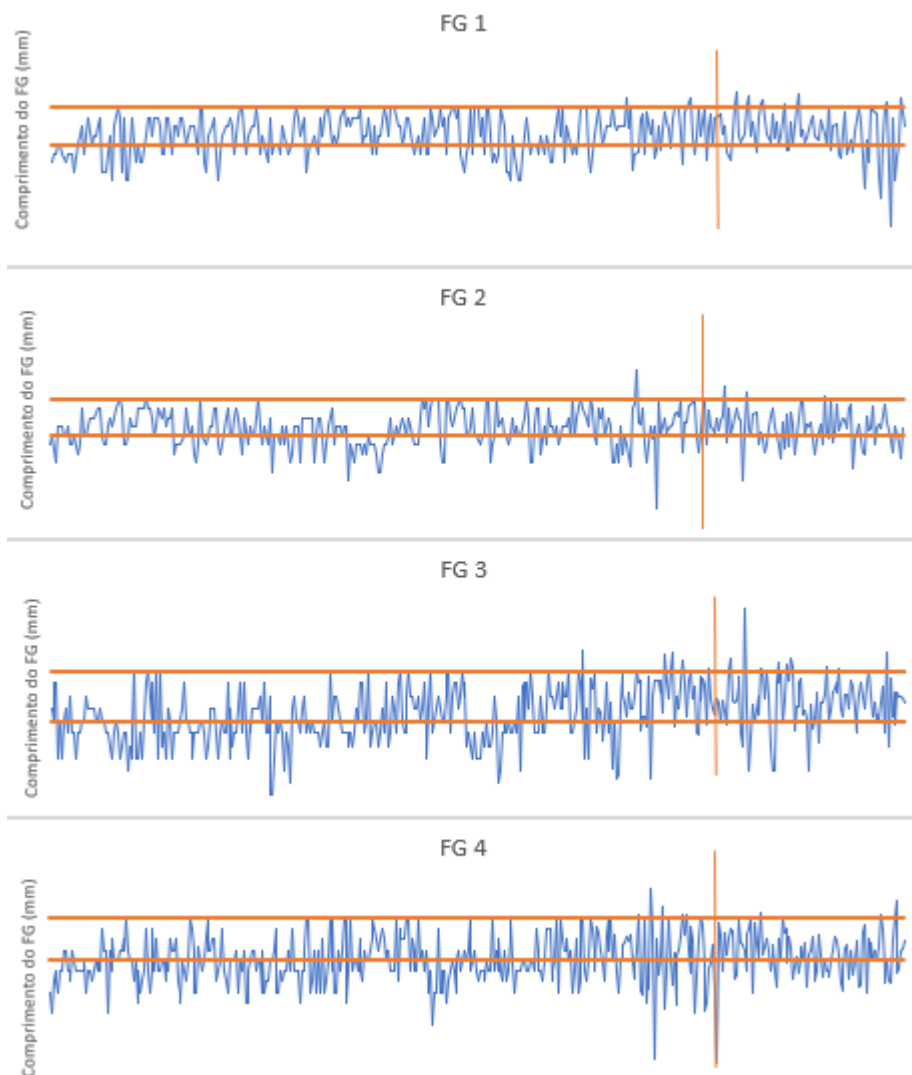
Tabela 5.3: Média de comprimento e desvio padrão por furo de gusa antes e depois da mudança de padrão

	Média de comprimento (anterior)	Média de comprimento (posterior)	Desvio padrão (anterior)	Desvio padrão (posterior)
FG 1	3201 mm	3228 mm	219,56	265,14
FG 2	3147 mm	3178 mm	194,77	188,15
FG 3	3127 mm	3251 mm	217,39	208,92
FG 4	3100 mm	3159 mm	223,87	214,09

Fonte: Autor

Observando a tabela 5.3 é possível notar que após a mudança do padrão de injeção de massa no momento da obturação dos furos de gusa a média de comprimento dos 4 (quatro) furos do alto-forno estudado aumentou, o que de acordo com estudos de Zhou *et al.* (2005), reduz o desgaste das paredes refratárias do cadinho aumentando a vida útil do reator, o desvio padrão nos furos 2 (dois), 3 (três) e 4 (quatro) diminuíram, o que resulta em maior estabilidade para o processo. Na figura 5.8 está representado a série temporal do comprimento dos 4 (quatro) furos de gusa do alto-forno estudado pela pesquisa.

Figura 5.8: Série temporal do comprimento dos furos de gusa



Fonte: Autor

As linhas horizontais em laranja representam o limite superior (3500mm) e inferior (3100mm) estabelecido como aceitável para o comprimento do furo de gusa. As linhas laranja em sentido vertical dividem à esquerda a série temporal do comprimento dos furos de gusa quando se ainda utilizava o padrão antigo de injeção de massa e à direita o comprimento do furo de gusa após a mudança no padrão de injeção.

6 CONCLUSÕES

- A variação de comprimento do furo de gusa tanto para comprimentos menores quanto para maiores afeta a produtividade do reator, gerando trincas no furo no momento da abertura ou dificultando a abertura de acordo com a capacidade dos equipamentos de perfuração, resultando em maior tempo de forno fechado e com isso menor produtividade.
- O aumento do comprimento do furo de gusa resulta em menor índice de escória, o que pode ser solucionado com o aumento do diâmetro da broca utilizada na abertura do furo ou através da melhora da qualidade do coque que proporcionará um cadinho mais permeável facilitando o fluxo da escória.
- A massa 2 utilizada no alto-forno em estudo teve melhor desempenho na maioria dos parâmetros analisados.
- O comprimento ideal para o furo de gusa do alto-forno estudado segundo a equação descrita é de 3060 milímetros, sendo que quanto menor é o desvio maior é a estabilidade do processo.
- O novo padrão proposto proporcionou mais estabilidade ao comprimento do furo de gusa e maior média de comprimento, o que aumenta a proteção do refratário do cadinho e a vida útil do reator.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, G. C. B. **Estudo do comportamento dos fluidos em um protótipo de um cadinho de Alto Forno durante o seu esgotamento**. 2019. (38f). Monografia. Graduação em Engenharia Química – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 2019.

ANDRADE, L. C.; OLIVEIRA, M. A.; JUNIOR, P. R. M.; FREIRE, D. R.; FERREIRA, C. G.; NETO, C. B. C.; BORTOLE, G. M. B.; ZATTONI, P. P. **Implantação de perfuratriz hidráulica no alto-forno 2 da CST-Arcelor Brasil**. Docplayer. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/37090081-Implantacao-de-perfuratriz-hidraulica-no-alto-forno-2-da-cst-arcelor-brasil.html>>. Acesso em: 31 ago. 2022.

BORGES, R. A. A. **Otimização do carregamento dos fornos de produção de aço (convertedores LD) minimizando custo**. 2016. (87f). Monografia. Especialização em Otimização de Sistemas – Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2016.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 6 ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.

CHO, D. S. **Otimização dos processos sinterização, alto-forno, aciária LD através da programação linear**. 1982. (98f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1982.

COSTA, V. L.; ESCORSIM, S. e COSTA, D. L. **Processo produtivo e produção de aço: a inserção do Grupo Gerdau S.A. no cenário mundial**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO, 2007, Ponta Grossa. **Proceedings[...]** Ponta Grossa, 2007, p.3-4.

GANDRA, B. F. **Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno**. 2006. (86f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Curso de Pós-graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006.

GEERDES, M.; CHAIGNEAU, R.; KURUNOV, I.; LINGIARDI, O.; RICKETTS, J. **Modern Blast Furnace Ironmaking: An introduction**. 3 ed. Amsterdam: IOS Press, 2015. 215p.

GEYER, P. G.; HALIFA, Z. **Blast furnace tapping practice at ArcelorMittal South Africa, Vanderbijlpark Works**. *In: Furnace Tapping Conference, 2014, South Africa. Proceedings[...]* South Africa, 2014. p.97-112.

HUANG, F.; ZHANG, Y.; DESHPANDE, R.; CHAUBAL, P.; Z, C. **Simulation of the Hearth Draining Process and Thermal Stress of BF Hearth**. *In: Iron & Steel Technology Conference, 2007, Indianápolis. Proceedings[...]* USA, 2007. p. 475-485.

LELIS, M. A.; ASSIS FILHO, V. P. e FERREIRA, K. C. **Estudo das variáveis do furo de corrida de um alto-forno**. *In: 48º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS E MATÉRIAS-PRIMAS, 2018, São Paulo. Proceedings[...]* São Paulo, 2018. p.156-162.

MOURÃO, M. B. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: ABM, 2007. 428p.

NELSON, L.R.; HUNDERMARK, R.J. **‘The tap-hole’ – key to furnace performance**. *In: Furnace Tapping Conference, 2014, South Africa. Proceedings[...]* South Africa, 2014. p. 1-31.

RIBEIRO, A. S.; LENZ e SILVA, G. F. B.; BASSALO, H. C.; BONADIA NETO, P.; PANDOLFELLI, V.C. **Técnicas de caracterização para o desenvolvimento de massas de tamponamento para altos-fornos**. São Carlos, 2013. 47-58p.

RIZZO, E. M. S. **Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno**. São Paulo: ABM, 2009. 278p.

RODRIGUES, A. D. **Modelagem e otimização do leito de fusão do alto-forno na Aperam**. 2020. (77f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2020.

SANTOS, E. T. B. **Avaliação da drenagem de líquidos do cadinho do alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão através de modelagem física e matemática**. 2009. (194f).

Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.

SANTOS, R. J. **Controle das temperaturas dos blocos de carbono do alto-forno, através de seu Sistema de refrigeração, visando o prolongamento de campanha.** 2005. 110f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2005.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia.** Belém: IFPA, 2011. 110p.

YAN, F.; ZHOU, C.Q.; HUANG, D.F.; CHAUBAL, P.; ZHAO, Y. Three-dimensional computational modeling of a blast furnace hearth. **Iron and Steel Technology**, v. 2, p. 48-58, 2005.

VIANA, A. O. **Modelagem e previsão de nível de líquidos em cadinhos de altos-fornos.** 2017. (58f). Monografia. Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2017.

ZHOU, C.Q.; YAN, F.; ROLDAN, D.; PATNALA, K. A.; HUANG, D.; CHAUBAL, P.; ZHAO, Y. **Evaluation of Internal Conditions In a Blast Furnace Hearth Using A 3-D Steady State CFD Model.** *In: AISTech 2005 Iron and Steel Technology Conference and Exposition, Charlotte, USA. Proceedings [...]*, 2005, p.283-292.