



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

**Universidade Federal de Ouro Preto**

**Escola de Minas**

**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**



# **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE CAMPANHA DE FURO DE GUSA DE UM ALTO-FORNO**

**Autor:** Eduardo Antônio Laia da Silva

**Orientador:** Prof. D.Sc. Johne Jesus Mol Peixoto (DEMET/UFOP)

**Ouro Preto/MG  
Agosto de 2022**

**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação de Campanha de Furo de  
Gusa de um 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

**Ouro Preto/MG**  
**Agosto de 2022**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Eduardo Antônio Laia da Silva**

### **Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação de Campanha de Furo de Gusa de um Alto-forno**

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

Aprovada em 30 de agosto de 2022

#### Membros da banca

DSc. - Johne Jesus Mol Peixoto - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DSc. - Cláudio Batista Vieira - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Enga.- Ana Karolina Menezes de Almeida (Gerdau Açominas S.A.)

Johne Jesus Mol Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/09/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/09/2022, às 22:45, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0392114** e o código CRC **16FFEF33**.

## SUMÁRIO

RESUMO	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo Geral	9
2.2 Objetivos Específicos	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 O Alto-forno	10
3.2 O Furo de Gusa	11
3.3 Perfuração do Furo de Gusa	13
3.4 Fechamento do Furo de Gusa	14
3.5 Interrupção de corrida	17
3.6 Corrida Consecutiva	19
3.7 A Massa de Tamponamento	19
3.8 A Campanha	20
3.9 As Estratégias para a Otimização de Vazamento do Alto-forno	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 Materiais	25
4.2 Métodos	25
4.2.1 Tempo de Campanha (dias)	27
4.2.2 Média Tempo de Corrida (minutos)	27
4.2.3 Intervalo Forno Fechado (minutos)	28
4.2.4 Média do Comprimento do furo de gusa (FG, milímetros)	28
4.2.5 Número de Procedimentos Operacionais (PO's ) para entrada do Canal	28
4.2.6 Somatório de massa nos PO's (quilogramas)	29

4.2.7	Número de Trincas durante a campanha	29
4.2.8	Desvio da Injeção de Massa (toneladas)	29
4.2.9	Número de Corridas durante a Campanha	29
4.2.10	Consumo Total de Massa na Campanha (toneladas)	30
4.2.11	Número de Retorno de Massa	30
4.2.12	Número de Eventos de Retenção de Escória	30
4.2.13	Número de Corridas Consecutivas	30
4.2.14	Número de Interrupções de Corrida	31
4.2.15	Média do Índice de Escória	31
4.2.16	Campanha Ótima de um Furo de Gusa	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6	CONCLUSÕES	40
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
9	ANEXOS	45

## RESUMO

O Alto-forno é um reator em regime de contracorrente que reduz minério de ferro e sinter a ferro-gusa e produz ainda escória e gases. A estabilidade operacional do alto-forno depende, entre outros fatores da correta drenagem do cadinho. Para esgotar o forno corretamente, é usado um sistema de perfuração e fechamento dos furos de gusa com perfurador e canhão, respectivamente. Entretanto, algumas imperfeições do processo, como interrupções de corrida, corridas consecutivas, etc., impedem que sua produtividade máxima seja extraída. Por meio da compilação de dados das corridas dos anos de 2021 e 2022 de um alto-forno de capacidade nominal de 7500 toneladas/dia, foi desenvolvido um sistema de avaliação da campanha do furo de gusa. Foram analisadas as interferências que fizeram cada campanha desviar-se do ideal. Com isso, foram sugeridos métodos de preparação para que sejam atingidas boas campanhas dos furos de gusa, que garantem produtividade ao forno.

**Palavras chave:** alto-forno; furo de gusa; campanha do Alto-forno.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Funcionamento do Alto-forno _____	11
Figura 3.2 - Desenho esquemático de um perfurador. _____	13
Figura 3.3 - Desenho esquemático de um canhão. _____	15
Figura 3.4 - Ilustração de um processo de tamponamento do furo de gusa _____	15
Figura 3.5 - Formação de “caroços” de massa acima do furo de gusa. _____	16
Figura 3.6 - (a). Fluxo constante de gusa. (b). Fluxo inconstante de gusa. _____	17
Figura 3.7 - “Dedo viscoso” formado pela alta taxa de drenagem do furo de gusa. _____	18
Figura 4.1 – Fluxograma de desenvolvimento da metodologia. _____	25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Campanha Ótima de um Furo de Gusa. _____	31
Tabela 5.1 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 1 _____	33
Tabela 5.2 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 2 _____	33
Tabela 5.3 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 3 _____	33
Tabela 5.4 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 4 _____	34
Tabela 5.5 – Frequência de causa de insucesso por furo de gusa _____	38
Tabela 9.1 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 1 _____	45
Tabela 9.2 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 2 _____	45
Tabela 9.3 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 3 _____	46
Tabela 9.4 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 4 _____	46

## 1 INTRODUÇÃO

O Alto-forno é carregado pelo topo com minério de ferro, sínter e coque e são injetados finos de carvão e ar quente através das ventaneiras que estão em sua base. O oxigênio se junta ao coque para formar o gás redutor monóxido de carbono e esse gás reduz o minério de ferro e o sínter a ferro gusa e produzindo ainda escória e gases. Os produtos do alto-forno são vazados através do furo de gusa pela ação do perfurador, que perfura o material refratário e libera o líquido que forma uma poça no cadinho. Após o vazamento de gusa e escória se encerrar, gases do alto-forno saem através do furo de gusa, o que indica que o líquido naquela área do cadinho se esgotou e que se deve fechar o furo para que mais líquido se deposite ali. O fechamento é feito com o canhão de massa de tamponamento, que injeta uma massa com tempo de cura suficiente para secar e endurecer, vedando por completo o furo de gusa.

Apesar de aparentar simplicidade, o processo apresenta diversas variáveis que o influenciam. Comprimento do furo de gusa, tipo da massa de tamponamento que vai fechá-lo, diâmetro da broca, tempo de corrida, vazão da corrida e falhas dos equipamentos são alguns desses parâmetros.

Nesse trabalho, foram caracterizadas algumas dessas variáveis, quais são seus impactos no processo. Juntamente com a posterior análise dos dados das corridas dos anos de 2021 e 2022 de um alto-forno de capacidade nominal de 7500 ton/dia, foi possível obter um modelo ótimo de campanha do furo de gusa e, por meio da preparação que levou a essa campanha, encontrar os parâmetros necessários para que os problemas de campanhas futuras sejam minimizados. Além disso, por meio desse sistema, foram avaliadas as campanhas passadas e para produzir um sistema de avaliação que mostre os erros que foram cometidos na preparação para a entrada dos furos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

- Desenvolver uma metodologia de avaliação de campanha do furo de gusa por meio da definição de parâmetros necessários para atingir melhores campanhas operacionais em um alto-forno de capacidade 7500ton/dia, com base na análise de dados históricos dos anos de 2021 e 2022.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Agrupar e avaliar dados das campanhas dos furos de gusa nos anos de 2021 e 2022;
- Revisão da literatura para identificar as condições e problemas operacionais relacionados à campanha de furos de corrida;
- Correlacionar as condições operacionais do Alto-forno aos dados selecionados;
- Avaliar cada campanha dos anos 2021 e 2022 individualmente;
- Encontrar um modelo que defina uma boa campanha;
- Definir quais parâmetros e condições que serão utilizadas para caracterizar uma campanha como boa ou não;
- Determinar a melhor preparação para a entrada da campanha do furo de gusa.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O Alto-forno

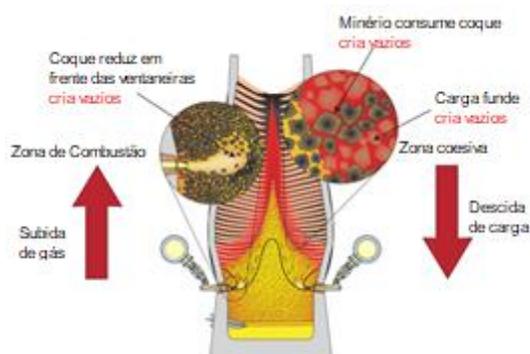
O Alto-Forno é um reator que é carregado pelo topo com coque, minério e sinter e onde são injetados pela base ar e carvão pulverizado por meio das ventaneiras. Este reator funciona em regime de contracorrente, reduzindo o minério de ferro e o sinter a ferro gusa, produzindo escória, que são depositados no cadinho, que é vazado periodicamente por meio dos furos de gusa (KUNDU e UPADHYAY, 2013; GEYER e HALIFA, 2014; HAUCK, KAYMAK e RAUSCH, 2017).

O alto-forno é carregado de forma que sejam dispostas camadas alternadas de redutor (coque) e carga metálica (minério de ferro e sinter). Essa disposição forma o leito e a carga que o compõe vai descendo verticalmente conforme a carga metálica vai sendo reduzida a ferro gusa e produzindo escória, que são depositados no cadinho (HAUCK, KAYMAK E RAUSCH, 2017; GEERDES *et al.*, 2020). O padrão de carregamento do forno é de suma importância pois reflete a forma, composição e localização da zona coesiva, além de revelar o comportamento dos processos de circulação que ocorrem no mesmo EC (2012).

A redução se dá através da passagem do monóxido de carbono através da carga metálica. O coque reage com ar quente injetado através das ventaneiras e forma esse gás redutor (AGRAWAL *et al.*, 2017; GEERDES *et al.*, 2020).

O alto-forno é o principal meio de produção do ferro gusa e produtividades consideradas altas para grandes altos-fornos são na faixa de 2,4 toneladas de ferro gusa produzidos por metro cúbico em 24 horas. Sabe-se que, devido a um Homem Morto menor acima da zona de combustão, os altos-fornos menores tendem a ter uma produtividade maior. A taxa de produção é limitada pela injeção de ar quente aceita pelo forno e pela drenagem de líquido do cadinho (AGRAWAL *et al.*, 2017; GEERDES *et al.*, 2020). A Figura 3.1 mostra o funcionamento de um alto-forno:

Figura 3.1 - Funcionamento do Alto-forno



Fonte: (GEERDES et al., 2020)

### 3.2 O Furo de Gusa

O furo de gusa é feito de material refratário e através dele são vazados do alto-forno o ferro gusa e a escória. O material usado para compor as paredes ao redor do furo de gusa é tijolo refratário e seu custo tende a aumentar com o aumento da sua condutividade térmica. Existem dois tipos de tijolos: de blocos pequenos, que dão maior facilidade na construção da parede e menor probabilidade de criação de trincas, porém lacunas são criadas retardando a transferência de calor, e de blocos grandes, que possuem menos lacunas, mas podem trincar devido às expansões térmicas e criar barreiras de transferência de calor (GEYER e HALIFA, 2014 *apud* AGRAWAL *et al.*, 2017). Aliado a isso, o material refratário de qual o furo de gusa é feito deve ter boa resistência à corrosão, de modo que não afete o número diário de corridas COMISSÃO EUROPEIA (EC, 2016).

Denomina-se “capela” a abertura da parede em que o furo de gusa está inserido. Essa abertura é feita de aço e está conectada à carcaça do cadinho ao longo do comprimento do furo de gusa. Tanto o furo de gusa quanto as paredes em seu entorno devem ser o mais impermeáveis possível durante o intervalo entre vazamentos, para que não ocorra o vazamento dos líquidos em local inadequado e também para resistir à pressão do líquido. Além disso, o furo de gusa e as paredes devem suportar as pressões dos líquidos e de gases durante a furação (EVANS *et al.*, 2002; GEYER e HALIFA, 2014). Durante o vazamento, o diâmetro do furo de gusa aumenta devido ao desgaste do refratário, que pode aumentar ainda mais caso o fluxo de líquido seja inconstante (BURGESS *et al.*, 1984; HE e STEVENSON, 2005; KUNDU e UPADHYAY, 2013). Um método para acompanhar esse aumento é o uso de câmeras filmadoras e sensores de dióxido de enxofre. Uma foto, dividida em pixels posteriormente, é tirada no momento de abertura do furo, no final da corrida e no momento em que começa o vazamento de escória. O início de vazamento de escória é

conhecido devido ao começo de detecção do dióxido de enxofre pelos sensores EC (2016). Aliado a isso, um comprimento mais curto do furo de gusa aumenta a erosão da parede do furo devido à interação entre esses mesmos líquidos e o material refratário, enquanto um comprimento mais longo reduz a intensidade do fluxo de metal na região próxima ao furo de gusa (INABA, *et al.*, 1990 *apud* FUKUTAKE *et al.*, 1998).

Para que o crescimento do comprimento do furo de gusa seja atingido, é necessário que uma coluna de coque (imersa no metal líquido e na escória líquida) esteja presente próximo ao furo de gusa. O fundo dessa coluna de coque deve estar abaixo do nível do furo de gusa. Além disso, também é necessário que o tempo de injeção de massa seja suficiente para que ela encrue. Oposto a isso, a diminuição gradual do comprimento do furo de gusa se dá em conjunto com o aumento gradual da temperatura do ferro gusa (FUKUTAKE *et al.*, 1998; EVANS *et al.*, 2002).

O aumento da granulometria do coque disposto próximo ao furo de gusa leva a um aumento da espessura da camada de gusa e a uma diminuição da espessura da camada de escória (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005). Além disso, o coque disposto próximo ao furo de gusa tem tendência a diminuir em tamanho devido à ao consumo de carbono nesse nível, o que leva a mais carbono no ferro gusa. Isso leva ao aumento dos poros no Homem Morto e é consequência da reação do óxido de ferro II na escória gotejada com o coque. Outra consequência disso é o aumento do tempo de corrida, que também pode aumentar com o aumento da temperatura da soleira do cadinho (INADA, IWANAGA e SUNAHARA, 1992; POST *et al.*, 2005 *apud* HAKONE, IIDA e OGURA, 2008). Um coque de maior granulometria tem maior resistência mecânica e leva a maior permeabilidade nesta região e, aliado a uma elevação da taxa de injeção de carvão pulverizado, leva a um desgaste característico de menor expressão no cadinho. A distribuição da taxa de injeção do carvão pulverizado é afetada por meio do uso de ventaneiras de diâmetros diferentes acima do furo de gusa (SANTOS, 2005). O tempo de corrida também aumenta com o aumento do nível de escória no cadinho (ARIYAMA *et al.*, 2005).

O controle do comprimento do furo de gusa pode se dar por meio do controle do fluxo de ar que sai pelas ventaneiras que estão posicionadas acima do furo de gusa ou por meio da injeção da quantidade correta de massa de tamponamento. Uma ventaneira fechada traz um aumento do comprimento do furo. A profundidade da zona de combustão é reduzida à frente de uma ventaneira parcialmente tamponada com massa ou diminuindo o diâmetro da

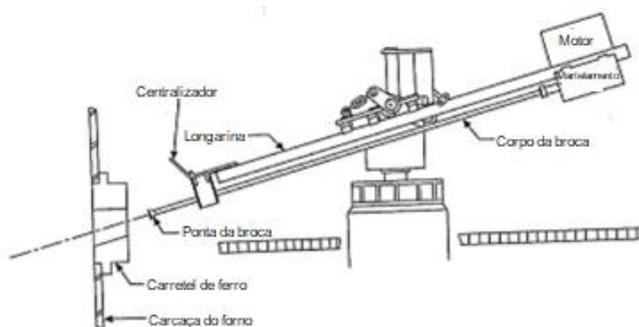
ventaneira. Entretanto, o fluxo gasoso dentro do forno pode ser afetado após a realização desse método de controle (FUKUTAKE *et al.*, 1998; SANTOS, 2005).

### 3.3 Perfuração do Furo de Gusa

O furo de gusa é perfurado com uma broca acoplada a um perfurador. O diâmetro da broca varia em função das taxas de perfuração do furo e de produção do alto-forno requeridas. O perfurador tem comandos de translação, rotação e martelamento da broca, que é acoplada ao perfurador e transladada ao longo do comprimento do furo de gusa, conforme vai acontecendo a furação. A alta dureza da massa de tamponamento encruada no furo leva à necessidade do martelamento da broca pouco antes de atingir o comprimento total do furo de gusa. Entretanto, isso deve ser evitado em situações onde o furo é danificado e a massa pode ser empurrada para dentro do cadinho (GEYER e HALIFA, 2014).

A Figura 3.2 mostra um desenho esquemático do perfurador:

Figura 3.2 - Desenho esquemático de um perfurador.



Fonte: GEYER e HALIFA, 2014.

O processo de perfuração do furo de gusa deve ser feito continuamente (sem interrupções durante a perfuração) e usar alternadamente dois furos, sem grandes intervalos entre vazamentos, o que é recomendado para uma boa estabilidade do processo (HAKONE, IIDA e OGURA, 2008; NOUCHI, TAKEDA e YASUI, 2003; EC, 2016). Além disso, sabe-se que as condições de perfuração, impostas pelas características físicas do furo, mudam ao longo de seu comprimento. Com isso, a proteção do furo de gusa é atingida com uma abertura usando apenas a translação e a rotação da broca. Porém, inclusões de carbono na massa que compõe a parte final do comprimento do furo de gusa deixam a massa mais dura e mais difícil de ser perfurada, necessitando o martelamento da broca (BODEVING *et al.*, 2016).

Após a perfuração, o ferro-gusa e a escória passam através do furo e caem no canal, onde são separados pelo *skimmer*, pela sua diferença de densidade (aproximadamente 6,9 g/cm<sup>3</sup> para o ferro gusa e 2 g/cm<sup>3</sup> para a escória). O *skimmer* permite que o ferro gusa passe por baixo e siga seu caminho pelo canal até o carro torpedo, enquanto a escória é barrada e segue caminho para a granulação (GEYER e HALIFA, 2014; AGRAWAL *et al.*, 2017).

Para que tenhamos alta produtividade e uma operação estável, uma drenagem efetiva dos materiais que estão no cadinho se faz necessária (NOUCHI, TAKEDA e YASUI, 2003; KUNDU e UPADHYAY, 2013). Com isso, o projeto *full pool* permite que o furo de gusa seja drenado apenas quando necessário, além de manter gusa líquido dentro do furo, o que faz com que a alta temperatura do refratário seja mantida e que seja inibida a oxidação do mesmo (SÁXEN e SHAO, 2013; KUNDU e UPADHYAY, 2013; GEYER e HALIFA, 2014).

O diâmetro da broca usada para a perfuração do furo de gusa é definido com base na taxa de produção do alto-forno. Quanto maior a broca, mais rápido o esgotamento do cadinho e, à altas taxas de produção, isso é o mais recomendado para que sejam evitadas quaisquer instabilidades do fluxo de líquidos e de permeabilidade do Homem Morto no cadinho (GEYER e HALIFA, 2014; AGRAWAL *et al.*, 2017). A velocidade dos líquidos no Homem Morto é influenciada pela alteração do diâmetro da broca EC (2012). Essas instabilidades podem trazer problemas na descida de carga, devido ao aumento do nível de líquidos no cadinho (ARIYAMA *et al.*, 2005; KUNDU e UPADHYAY, 2013).

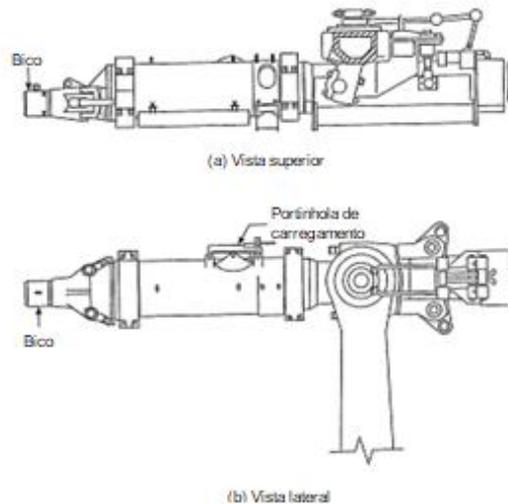
O furo de gusa se desgasta conforme vai ocorrendo a corrida e, para que seja diminuída o volume de escória residual, a mudança do seu diâmetro deve ser controlada durante a perfuração (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005). Uma broca de diâmetro maior pode trazer dificuldades para o fechamento do furo (segundo alguns operadores), porém um diâmetro maior do furo de gusa leva à uma velocidade de vazamento menor, o que reduz o nível de escória no cadinho (ARIYAMA *et al.*, 2005).

### **3.4 Fechamento do Furo de Gusa**

Normalmente, o fim da corrida é notado por causa do escape de gases, que vem do nível das ventaneiras, através do furo de gusa, levando a um jato inconstante e inconsistente. Isso acontece devido à inclinação do nível de líquidos naquela região do cadinho (NOUCHI, TAKEDA e YASUI, 2003; HAUCK, KAYMAK E RAUSCH, 2017). Com isso, faíscas são

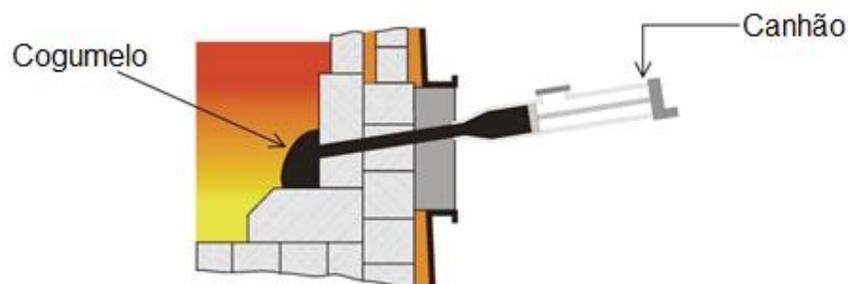
emitidas e indicam que o forno está seco e pronto para a vedação do furo de gusa. Após isso ocorrer, o canhão, que está carregado com massa de tamponamento, é transladado até que o bico encontre a boca do furo de gusa e, então, a massa é empurrada para dentro do furo até que ele seja vedado (GEYER e HALIFA, 2014). As Figuras 3.3 e 3.4 mostram um desenho esquemático do canhão e o processo de tamponamento do furo de gusa, respectivamente.

Figura 3.3 - Desenho esquemático de um canhão.



Fonte: (GEYER e HALIFA, 2014)

Figura 3.4 - Ilustração de um processo de tamponamento do furo de gusa



Fonte: (GEYER e HALIFA, 2014).

O fechamento correto do furo de gusa depende da qualidade e do uso correto da massa de tamponamento, das capacidades do perfurador e do canhão, da vedação de gás ao redor do furo de gusa e do ritmo de produção do alto-forno (GEYER e HALIFA, 2014; AGRAWAL *et al.*, 2017).

Além disso, a boa limpeza e moldagem da boca do furo de gusa deve ser garantida de forma que sejam reduzidos os riscos de pressão alta no fechamento (que ocasiona falta de massa e,

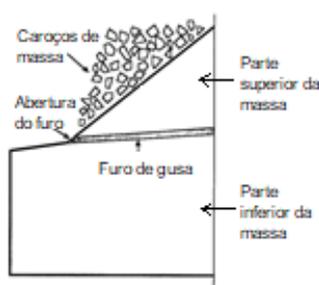
consequentemente, comprimentos mais curtos), vazios dentro do furo de gusa que podem ser preenchidos com gusa e escória, que solidificar-se-ão e trarão dificuldades na abertura, e arrombamentos de furo de gusa (GEYER e HALIFA, 2014).

Outro problema que pode ocorrer durante um fechamento é o retorno da massa de tamponamento pelo furo de gusa, que pode ser ejetada ao canal. Isso leva a uma falha na vedação do furo de gusa, que, como consequência, indica que o canhão deve ser recarregado e o processo de tamponamento e posterior moldagem da boca do furo de gusa deve ser feito novamente (GEYER e HALIFA, 2014).

Variações nos comprimentos do furo de gusa não são recomendadas e podem ser atribuídas à capacidade do canhão, quantidade de massa tamponada dentro do furo no fechamento anterior e qualidade dessa mesma massa. Um furo muito longo pode resultar na incapacidade de abertura pelo perfurador, sendo necessário o uso de oxigênio para que o furo seja aberto, enquanto um muito curto pode resultar num risco à segurança da área durante sua abertura. Para que a operação seja estável, o furo de gusa deve ter seu comprimento aproximadamente constante e ser, no mínimo, maior que a espessura inicial dos blocos de carbono que compõe o cadinho, formando um cogumelo de tamanho adequado para a proteção do furo de gusa (GEYER e HALIFA, 2014; HAUCK, KAYMAK E RAUSCH, 2017).

Visando aumentar o comprimento do furo de gusa, uma operação comum é injetar mais massa que o necessário para que seja formado o cogumelo. Entretanto, ao injetar massa sem seguir estágios de injeção, ela não adere à massa antiga que forma as paredes do furo de gusa e entra no cadinho. Ao entrar no cadinho, devido às interações com gusa e escória líquidos, a massa se desfaz e forma “caroços” que, devido à sua densidade e ao fluxo de líquidos, se mantêm próximos ao furo de gusa acima do nível de líquido da escória (OHARA *et al.*, 1989 *apud* FUKUTAKE *et al.*, 1998). A Figura 3.5 mostra um desenho esquemático desse fenômeno:

Figura 3.5 - Formação de “caroços” de massa acima do furo de gusa.

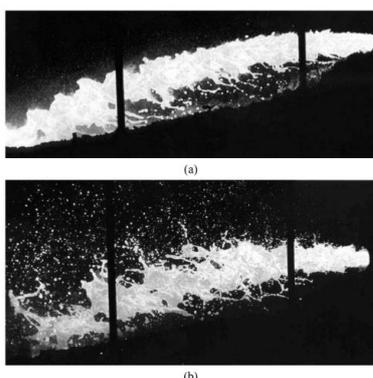


Fonte: (OHARA *et al.*, 1989 *apud* FUKUTAKE *et al.*, 1998).

### 3.5 Interrupção de corrida

A interrupção de corrida se dá devido ao vazamento prioritário de gás imediatamente após o final da perfuração do furo de gusa. Isso pode ser em devido a trincas que surgem no material refratário que compõe o furo de gusa e o cogumelo no interior do forno, pois esse revestimento é constantemente impactado pelo perfurador e pelo canhão (ZHANG, 2013). Como dito anteriormente, essa saída de gás no início do processo acontece devido à uma perfuração fora do ideal e leva à emissão de fumaça, juntamente com um fluxo de gusa inconstante. A única ação possível a se tomar quando isso ocorre frequentemente é o fechamento do furo de gusa (EVANS *et al.*, 2012). A Figura 3.6 exemplifica um fluxo constante de gusa (a) e um fluxo inconstante de gusa (b) no início da corrida.

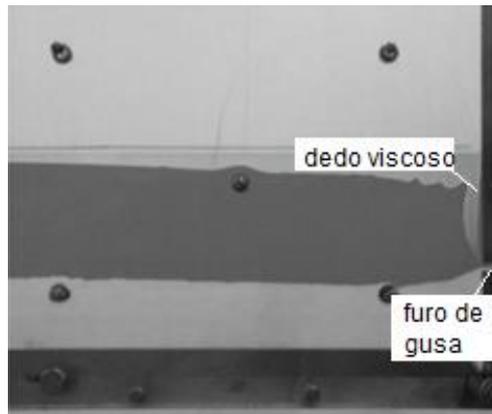
Figura 3.6 - (a). Fluxo constante de gusa. (b). Fluxo inconstante de gusa.



Fonte: (EVANS *et al.*, 2012)

Durante a drenagem do cadinho, na interface gás-líquido no interior do alto-forno pode ocorrer o deslocamento do líquido pelo gás (menos viscoso), que penetra o leito e o furo de gusa devido às instabilidades de Saffman-Taylor. Isso forma os chamados “dedos viscosos” na interface gás líquido, que ocorrem devido à substituição de escória pelo gás. Um parâmetro para a análise desse fenômeno é a velocidade de descida da interface, que varia com a distância ao furo de gusa e tem seu valor máximo na região imediatamente acima do furo (EVANS *et al.*, 2012). Se o valor dessa velocidade supera o valor crítico, a escória é substituída pelo gás que passa através do furo prematuramente. Esse valor crítico é diminuído com o aumento da viscosidade do fluido que será substituído. (SAFFMAN e TAYLOR, 1958 *apud* EVANS *et al.*, 2012). Para que a interface seja estável e esse fenômeno não ocorra, uma boa permeabilidade do leito deve ser atingida (EVANS *et al.*, 2012). A Figura 3.7 mostra um exemplo de “dedo viscoso”.

Figura 3.7 - “Dedo viscoso” formado pela alta taxa de drenagem do furo de gusa.



Fonte: (EVANS et al., 2012)

Sabe-se que o aumento da viscosidade da escória aumenta a possibilidade de formação dos “dedos viscosos”, enquanto o aumento do nível de líquido no cadinho causa a diminuição da possibilidade de ocorrência desse fenômeno (SAFFMAN e TAYLOR, 1958 *apud* EVANS *et al.*, 2012).

Quando há uma zona com coque no leito imediatamente acima do furo de gusa, os líquidos deveriam ser levados normalmente para o vazamento através do furo de gusa. Isso, em taxas de drenagem altas, levaria a um baixo tempo para a passagem de gás. Entretanto, o líquido que está acima (escória) não tem velocidade o suficiente para suplementar o volume do furo de gusa e ser vazado devido à sua alta viscosidade e, então, ele flui para dentro do leito. Isso aumenta drasticamente a velocidade da interface gás-líquido (EVANS et al., 2012). Essa zona com coque pode diminuir a temperatura dos líquidos no cadinho e dificulta um pouco o fluxo do gusa para o furo (ICHIDA *et al.*, 2006).

Os líquidos dispostos dentro do leito vão suplementar o volume do furo de gusa e vazar para fora do alto-forno caso o fundo do leito coincida com o nível do furo de gusa. Isso ocorre devido à resistência ao fluxo de líquido na região sem coque ser menor que na região do leito. Com isso, a interface gás-líquido se move mais uniformemente (EVANS et al., 2012). O aumento da profundidade e largura da zona sem coque no cadinho aumenta a duração do período de passagem do gás, ao contrário do aumento da taxa de drenagem, diminuição do nível de gusa e escória no cadinho e aumento da viscosidade da escória (EVANS et al., 2012; ICHIDA *et al.*, 2006; HAUCK, KAYMAK E RAUSCH, 2017).

### **3.6 Corrida Consecutiva**

Para que uma drenagem uniforme do cadinho seja garantida, o vazamento de furos opostos é adotado durante uma produção de gusa à níveis normais (próximo à capacidade nominal). O vazamento consecutivo do mesmo furo, denominado “corrida consecutiva”, é adotado em níveis de produção mais baixos e também em casos excepcionais que impedem o vazamento alternado dos furos, como falha nos equipamentos usados para manter o processo em regime constante (perfurador, canhão, entre outros), falha no posicionamento dos carros torpedo, atrasos devido à limpeza da área, etc. Esses fatores levam à necessidade de reduzir a taxa de produção do alto-forno para que o nível de líquido do cadinho seja mantido (GEYER e HALIFA, 2014).

### **3.7 A Massa de Tamponamento**

A massa de tamponamento é feita de material refratário, que é composto de agregados, aditivos e plastificantes e é usada para que o fluxo dos líquidos que saem do forno seja controlado, além de vedar o furo de gusa e proteger os blocos de carbono que compõe o cadinho (GEYER e HALIFA, 2014; EC, 2016).

Como dito anteriormente, o desgaste da massa de tamponamento durante o vazamento leva a um aumento do diâmetro do furo de gusa. Com isso, a resistência à corrosão da massa é um parâmetro fundamental que impacta a drenagem do cadinho, afetando o regime hidrodinâmico de vazamento EC (2016).

A facilidade de abertura de um furo de gusa depende da experiência do operador que usa o perfurador, mas também depende da espessura dos grãos que compõe a massa de tamponamento. Massas que são compostas por grãos menores que 3 milímetros são mais fáceis de perfurar que aquelas compostas por grãos maiores que 3 milímetros. Além disso, uma massa composta por grãos grandes pode ser prejudicial devido ao seu maior tempo de cura e aos riscos de uma corrida mais curta devido a esse maior tempo (GEYER e HALIFA, 2014). Uma corrida curta também pode ser consequência de uma temperatura menor na soleira do cadinho (HAKONE, IIDA e OGURA, 2008).

Além de facilitar ou dificultar a abertura, o tamanho dos grãos da massa de tamponamento também influencia a capacidade de penetrar em trincas que podem ter se formado nos tijolos refratários no entorno do furo de gusa e no cogumelo (GEYER e HALIFA, 2014).

Antes que seja aberto, deve ser observado tempo de cura suficiente para a consolidação da massa. Durante a cura, os voláteis são queimados e a massa começa a endurecer para que o selo do furo seja ideal (GEYER e HALIFA, 2014).

O plastificante, citado anteriormente, dá à massa de tamponamento as qualidades necessárias para uma boa vedação. Ligado a isso, a temperatura da massa e à compatibilidade entre as massas usadas anteriormente e a atual são necessárias para a formação do cogumelo no final do furo de gusa, que vai se desfazendo devido à abrasão pelos líquidos existentes no forno durante o vazamento EC (2016).

A escolha da melhor massa de tamponamento deve se dar pela sua rápida cura. Apesar de algumas massas terem tempos de cura muito longos (em média de até 200 minutos), isso facilita e minimiza os problemas da perfuração (FUKUTAKE *et al.*, 1998; EC, 2016).

Um método de verificar a eficiência da massa de tamponamento é encontrar a razão entre o comprimento do furo de gusa e a quantidade de massa injetada (FUKUTAKE *et al.*, 1998).

Uma massa de tamponamento anídrica, com alta força de ligação e melhor performance anti corrosão se adapta melhor aos diversos cenários de fechamento do furo de gusa e deve ser utilizada (ZHANG, 2013).

### **3.8 A Campanha**

Num alto-forno munido de sistemas de refrigeração e revestimentos modernos, a durabilidade do revestimento do cadinho define sua vida útil. Devido a isso, para que sejam atingidas longas campanhas, é de suma importância a proteção do cadinho e do furo de gusa, já que suas condições ditam a duração da campanha do forno (KURUNOV, LOGINOV e TIKHONOV, 2006; BODEVING *et al.*, 2016). Um revestimento refratário de alta qualidade feito de carbono e um resfriamento razoável são necessários para que a vida útil do cadinho e da soleira sejam estendidas (HE e STEVENSON, 2005; ZHANG, 2013). A vida útil desse revestimento pode ser aumentada por meio da introdução de matérias formadoras de crostas no forno, como, por exemplo, o titânio. Isso se dá pelas ventaneiras, pela carga, ou então por uso de equipamentos especiais (KURUNOV, LOGINOV e TIKHONOV, 2006; ZHANG, 2013). Existem dois tipos de desgaste mais comuns do cadinho: uma camada frágil formada próxima à isoterma de 800°C na parede lateral do cadinho (isso pode ser causado por precipitação de carbono, de compostos de potássio, oxidação de zinco ou de carbono pela água e estresses térmicos) e uma forma característica de desgaste chamado “pata de

elefante”, devido ao seu formato curvo, que é caracterizado pela erosão da parede e do fundo do cadinho na região abaixo do nível do furo de gusa. A “pata de elefante” é causado pela obstrução do Homem Morto, que também pode causar baixa qualidade do gusa e descida irregular da carga (RAIPALA, 2003).

A campanha de um alto-forno pode ser dividida em dois períodos principais. No primeiro, que dura de 5 a 10 anos após o início da operação, não é necessário ter um cuidado especial com o revestimento do cadinho. Apesar disso, necessita-se que a temperatura da soleira seja aferida constantemente para que sejam notados picos, que indicam um desgaste excessivo devido a exposição da região a cargas mais agressivas, que tendem a aumentar ou diminuir a espessura da crosta de escória protetora. No segundo período, o desgaste de certas regiões do cadinho é maior e esse desgaste se torna problemático quando se encontram infiltrações de gusa nos refratários. Com isso, são necessárias medidas para estender a vida útil do cadinho nesse período e, entre elas, estão o fechamento de ventaneiras, injeção de materiais que têm elementos formadores de carbetos (através das ventaneiras ou na carga), aumentar a refrigeração do cadinho e da soleira, etc. Todos esses métodos têm o objetivo de aumentar a espessura da crosta de escória protetora do cadinho (KURUNOV, LOGINOV e TIKHONOV, 2006).

Para que a vida útil e a campanha sejam aumentadas, é necessário que a produção do alto-forno seja diminuída, se esta foi alcançada devido enriquecimento do ar com o uso de oxigênio, o que diminui a duração da campanha devido ao acréscimo de temperatura a zona de combustão (KURUNOV, LOGINOV e TIKHONOV, 2006; AGRAWAL *et al.*, 2017).

Além disso, a redução do desgaste devido a tensões térmicas pode ser atingida diminuindo o número e a duração de paradas do forno. Esses estresses levam a contrações e dilatações do material refratário que reveste o cadinho, criando trincas ou até a quebra do mesmo. Uma alternativa é a adoção de tijolos de carbono com características de resistência à erosão, resistentes à penetração e com alta condutividade térmica em posições chave na construção da estrutura do cadinho (KURUNOV, LOGINOV e TIKHONOV, 2006; ZHANG, 2013).

### **3.9 As Estratégias para a Otimização de Vazamento do Alto-forno**

Em termos de economia, consumo de energia e segurança operacional, o nível de líquido e a drenagem do cadinho tem papel fundamental na estabilidade e eficiência dos processos que ocorrem no alto-forno como um todo EC (2016). Dito isto, o controle do nível de

líquidos no cadinho é de suma importância para a produção do ferro gusa e da escória do alto-forno. Caso ele aumente de forma descontrolada, uma operação estável é prevenida. Levando em conta o fato de que a produção de líquidos é contínua, porém seu vazamento não, pode ser feita uma estimativa que calcula a taxa de produção de gusa e a compara com uma taxa de vazamento (ARIYAMA *et al.*, 2005; GEYER e HALIFA, 2014; ITO, NAGAMUNE E YOTSUJI, 2014; AGRAWAL *et al.*, 2017). O nível de líquidos no cadinho, a variação desses mesmos níveis durante a operação do forno, a velocidade e o caminho do fluxo do líquido durante o vazamento são características importantes da performance da drenagem EC (2016). Essas condições podem ser atingidas por meio de simulação matemática, devido à impossibilidade de visualização direta das condições existentes. Como o processo envolve o fluxo de dois líquidos (gusa e escória) num meio não homogêneo e poroso, a simplificação de diversas variáveis é necessária (NOUCHI, TAKEDA e YASUI, 2003).

Na drenagem do cadinho, as condições da sua zona perimetral determinam os padrões de sua drenagem. A eficiência da drenagem é facilitada caso não haja uma região em que gusa interage com partículas finas de coque próxima ao furo, dando ao gusa um fluxo prioritário no vazamento. Com isso, a velocidade próxima ao furo de gusa é a maior devido à permeabilidade naquela região (NOUCHI, TAKEDA e YASUI, 2003). Oposto a isso, a granulometria do coque que se encontra no leito, os espaços que não são ocupados por coque e a zona impermeável abaixo do nível no qual se encontra o furo de gusa afetam pouco o padrão de drenagem do cadinho. (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005; ZHANG, 2013). Após a saturação do gusa, a sua velocidade próxima ao furo de gusa aumenta drástica e rapidamente (NOUCHI, TAKEDA e YASUI, 2003). Para que haja uma operação estável e tranquila do alto forno, o fluxo de gusa na periferia do cadinho deve ser minorado, enquanto a permeabilidade de líquidos e gases no centro do Homem Morto devem ser altas o suficiente para o processo acontecer. Um Homem Morto com baixa permeabilidade (obstruído) leva ao acúmulo de gusa nas bordas do cadinho (próximo ao furo de gusa), causando desgaste na estrutura do cadinho naquela região. Isso pode trazer diversos problemas, como entrada de água no forno, distribuição irregular de carga, baixa taxa de produção, etc. Para retirar o Homem Morto dessa condição, pode levar entre três e cinco semanas (RAIPALA, 2003; MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005; ZHANG, 2013).

Apesar de não afetar a taxa de drenagem total, os padrões da taxa de drenagem de ferro gusa e escória são afetados pelas condições da região periférica do cadinho que está próxima ao

furo de gusa. Isso se dá pela granulometria do coque nessa região, que deve ter diâmetros relativamente altos para que haja a diminuição do volume residual de escória no vazamento. Esse volume pode ser diminuído caso a estrutura do leito seja controlada. Entretanto, a viscosidade da escória aumenta com a diminuição da temperatura do cadinho e também afeta a taxa de drenagem do gusa e dela mesma. Com isso, chega-se à conclusão que, se for possível mensurar padrões de drenagem, a estrutura da região pode ser prevista (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005; SÁXEN e SHAO, 2013; ITO, NAGAMUNE E YOTSUJI, 2014).

O intervalo de vazamento longo também leva à um bom comprimento do furo de gusa e a um acúmulo de líquidos no cadinho. Caso o furo seja aberto rapidamente, o comprimento diminui e as perdas térmicas aumentam (GEYER e HALIFA, 2014).

O nível de líquido no cadinho aumenta caso a drenagem do furo de gusa não seja feita no intervalo correto e, caso esse nível fique próximo à zona de combustão, problemas começam a surgir devido à distúrbios na operação do forno. (EC, 2016; SAXÉN e SHAO, 2012). Esses problemas também podem ser trazidos pelo alto nível de escória residual no cadinho (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005; KUNDU e UPADHYAY, 2013). Caso haja uma zona sem partículas de coque próxima ao furo de gusa, o nível máximo de líquidos é diminuído significativamente (NOUCHI, TAKEDA e YASUI, 2003). Em outro cenário, se a permeabilidade da zona próxima ao furo de gusa seja alta mesmo com a presença de coque, o volume de escória residual no cadinho é diminuído (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005). De toda forma, a melhora da permeabilidade é um fator essencial para diminuir o nível de escória. Isso mostra que, em um processo com alta produtividade, a qualidade do coque é mais importante que a qualidade da basicidade do sínter para diminuir o nível de escória (ARIYAMA *et al.*, 2005).

Apesar disso, o intervalo entre corridas deve ser minimizado, enquanto o tempo de cada corrida deve ser aumentado para que o nível de líquidos, assim como suas variações, seja mantido baixo no cadinho e os efeitos de um vazamento descontínuo seja minimizado (ZHANG, 2013; EC, 2016). Um nível de líquidos uniforme no cadinho pode ser prejudicial ao processo e, oposto a isso, um nível de líquidos não uniforme pode trazer uma operação estável com a abertura do furo onde o nível se encontra mais alto (ITO, NAGAMUNE E YOTSUJI, 2014). Intervalos baixos entre drenagens alternadas de furos opostos levam a um vazamento prioritário de escória devido ao nível de ferro gusa no cadinho estar abaixo do nível do furo (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005).

Caso o intervalo entre vazamentos seja muito baixo, observa-se um vazamento prioritário de escória (interrupção de gusa) e, posteriormente (após o fechamento do furo), o ferro gusa é movido para cima no interior do alto-forno, onde ele se solidifica devido às baixas temperaturas (GEYER e HALIFA, 2014). Um atraso no vazamento de escória, no início do vazamento, vem de um alto nível de gusa no cadinho. Isso mostra um desbalanço no vazamento e leva a uma condição em que, durante uma dificuldade de drenagem de um furo, aumenta o nível de líquidos e desencadeia uma dificuldade na drenagem do furo oposto (ARIYAMA *et al.*, 2005). Caso a viscosidade da escória aumenta, o volume retido da mesma aumenta, o que leva a um aumento no nível de líquidos no cadinho. Alternativamente, uma forma de trazer o mesmo efeito que a diminuição da viscosidade da escória leva ao processo é aumentar o diâmetro do coque que fica próximo à região do furo de gusa, o que aumenta a permeabilidade do cadinho (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005).

O tempo necessário para a drenagem aumenta com a diminuição do diâmetro do coque ou com a diminuição da fração de vazios no cadinho, devido à queda de permeabilidade do leito. Isso se dá em consequência da diminuição da espessura da camada de escória do cadinho. Com isso, ambas as condições levam a uma diminuição de permeabilidade no cadinho. Esse aumento do tempo necessário para a drenagem causa uma queda de pressão no furo de gusa e no cadinho e, conseqüentemente, uma queda na taxa de drenagem total (MAEDA, NISHIOKA e SHIMIZU, 2005). Estimar essa fração de vazios é fundamental para que seja obtida uma modelagem que corresponda à correta drenagem do cadinho (KUNDU e UPADHYAY, 2013).

Caso o líquido chegue ao nível das ventaneiras, o fluxo gasoso é alterado, o que afeta a sua efetividade. Além disso, o líquido se solidifica em torno do coque e reduz o calor disponível no processo. Se não houver uma compensação dessa situação por meio de injeção de carvão pulverizado através das ventaneiras ou então adição de mais coque, a temperatura do líquido tende a decrescer e o forno a congelar (GEYER e HALIFA, 2014; ITO, NAGAMUNE E YOTSUJI, 2014; HAUCK, KAYMAK E RAUSCH, 2017).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

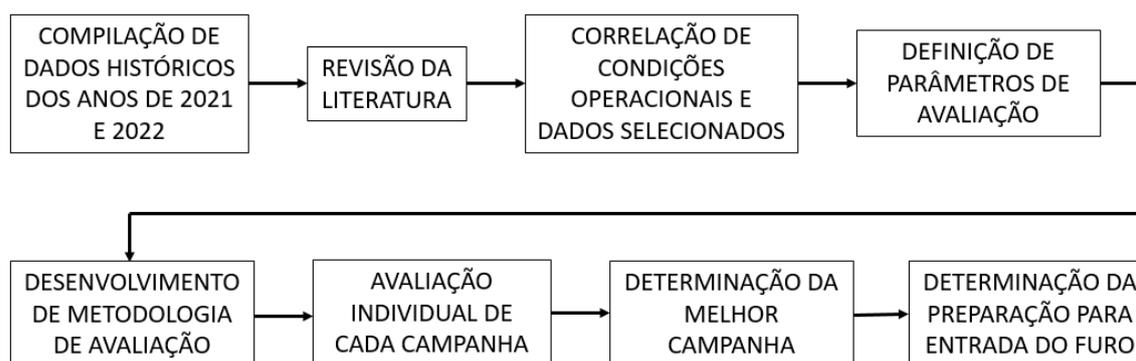
Devido à natureza deste trabalho, avaliativa do desempenho das operações de abertura e tamponamento dos furos de vazamento de gusa, com base em dados coletados pelo sistema supervisório, não se fizeram necessários experimentos em laboratório ou industriais.

Por questão de sigilo industrial não serão descritas a perfuratriz e o canhão e as características das massas (tais como informadas pelos fabricantes) não serão disponibilizadas.

### 4.2 Métodos

Foram utilizados relatórios diários de operação, planilhas de dados gerais das corridas, planilhas de dados das entradas dos furos de gusa, planilhas de médias diárias dos dados das corridas, programas para cálculos e organização de dados (Microsoft Excel) e artigos científicos e relatórios sobre os temas abordados. A figura 4.1 traz um fluxograma que mostra a metodologia aplicada para desenvolvimento do trabalho:

Figura 4.1 – Fluxograma de desenvolvimento da metodologia.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Foi utilizado o programa Microsoft Excel para que fossem compilados os dados das campanhas dos quatro furos de gusa desde a primeira campanha do ano de 2021 de cada furo. Os dados compilados foram:

- Tempos de operação (dias);

- Tempo fora de operação (dias);
- Média do Tempo de Corrida (minutos);
- Média do Intervalo visado entre aberturas (minutos);
- Média do Comprimento do Furo de Gusa (milímetros);
- Comprimento do furo de gusa na última corrida da campanha anterior (milímetros);
- Comprimento do furo de gusa na primeira corrida da campanha atual (milímetros);
- Desvio do comprimento durante o tempo fora de operação (milímetros);
- Número de procedimentos operacionais para a entrada do canal;
- Somatório de massa nos procedimentos operacionais (quilogramas);
- Observação acerca dos procedimentos operacionais;
- Número de trincas durante a campanha;
- Fornecedor da massa de tamponamento;
- Desvio da injeção de massa (toneladas);
- Número de corridas durante a campanha;
- Produção da campanha (mil toneladas);
- Consumo total de massa da campanha (toneladas);
- Número de Retorno de Massa;
- Número de Eventos de Retenção de Escória;
- Tempo de Alto Forno fechado durante a campanha (minutos);
- Número de Corridas Consecutivas;
- Número de Interrupções de Corrida;
- Média do Índice de Escória.

Para que a busca pelo modelo ideal seja facilitada, os parâmetros que foram analisados para encontrar um modelo ótimo de campanha foram:

- Média Tempo de Campanha (dias);
- Média Tempo de Corrida (minutos);
- Intervalo Forno Fechado (minutos);
- Média do Comprimento do FG (milímetros);
- Número de Procedimentos Operacionais (PO's) para entrada do Canal;
- Somatório de massa nos PO's (quilogramas);
- Número de Trincas durante a campanha;

- Desvio da Injeção de Massa (toneladas);
- Número de Corridas durante a Campanha;
- Produção da Campanha (mil toneladas);
- Consumo Total de Massa na Campanha (toneladas);
- Número de Retorno de Massa;
- Número de Eventos de Retenção de Escória;
- Número de Corridas Consecutivas;
- Número de Interrupções de Corrida;
- Média do Índice de Escória.

Cada campanha foi ranqueada de acordo com os índices citados anteriormente. Quando o valor encontrado em determinado parâmetro se encontrava dentro do intervalo definido como ideal para aquele parâmetro, a categoria auferia 1 (um) ponto. Quando estava fora do intervalo, 0 (zero) pontos. O máximo de pontos que uma campanha pode obter é 16 (dezesesseis) e o mínimo é 0 (zero). A partir da campanha avaliada como a de melhor desempenho, foram identificados os métodos que levaram à sua preparação e, ao final, sugerida a melhor forma de se preparar uma campanha para que os problemas sejam minimizados e o desempenho seja o melhor possível.

Os critérios para cada parâmetro são explicados abaixo:

#### **4.2.1 Tempo de Campanha (dias)**

A campanha de um furo de gusa é a quantidade de dias em operação desde o início (após reforma do canal) e fim de operação (parada para nova reforma do canal). Eliminando o número de dias de campanhas muito curtos (ex.: o tempo da campanha 5 do furo de gusa 4 foi de 2 dias), chegou-se à média de tempo de campanha de 28 (vinte e oito) dias. Considerando atrasos e adiantamentos de no máximo 2 (dois) dias de operação, tem-se:

$$26 \leq t_{ca} \leq 30$$

#### **4.2.2 Média Tempo de Corrida (minutos)**

Eliminando médias de tempo de corridas de campanhas muito baixos (menores que 160 min), chegou-se em valores por volta de 180 (cento e oitenta) minutos para cada furo. Assumindo uma tolerância de 10 (dez) minutos para mais e para menos, tem-se:

$$170 \leq t_{co} \leq 190$$

#### **4.2.3 Intervalo Forno Fechado (minutos)**

Considerando 190 (cento e noventa) minutos como o tempo ideal de uma corrida, tem-se que, em um dia (1.440 minutos), o número ideal de corridas é:

$$n_{co} = \frac{1440 \text{ min}}{190 \text{ min}} = 7,58$$

Contabilizando que esse valor é válido na operação utilizando furos opostos, tem-se que o valor ideal de corridas em um furo por dia é de 3,79. Em uma campanha de 28 dias, tem-se que o total ideal de corridas é aproximadamente 106 em um único furo. Considerando um máximo de 0,6 minutos de forno fechado por corrida, tem-se que o tempo ideal de forno fechado de 63,6 minutos. Valores elevados deste parâmetro são altamente prejudiciais ao processo, de modo que foi considerado que o tempo máximo de forno fechado deve ser de 60 min.

#### **4.2.4 Média do Comprimento do furo de gusa (FG, milímetros)**

Eliminando comprimento médios muito baixos, chegou-se a um valor mínimo ideal de 3.100 milímetros para o comprimento do furo de gusa. Sabe-se que comprimentos muito longos não são ideais, pois trazem dificuldade na abertura, então limitou-se que o máximo do valor de comprimento ideal é 3.400 milímetros. Logo, tem-se que:

$$3.100 \leq m_{comp} \leq 3.400$$

#### **4.2.5 Número de Procedimentos Operacionais (PO's ) para entrada do Canal**

O furo perde comprimento durante o período fora de operação por causa da interação com os líquidos naquela região. Por isso, é importante que sejam feitos procedimentos operacionais para o seu retorno. Porém, a realização de muitos procedimentos operacionais mostra que eles não foram efetivos, o que não é ideal. Visto isso, definiu-se o número ideal

de PO's como sendo dois ou três. Alguns dados dessa categoria foram perdidos e, para que não atrapalhassem a avaliação, foram retirados do modelo ótimo.

#### **4.2.6 Somatório de massa nos PO's (quilogramas)**

A boa injeção de massa nos PO's faz toda diferença para uma boa entrada da área. Como citado anteriormente, muitos PO's mostram ineficiência e prejudicam a operação. Como visou-se dois PO's como o mínimo ideal, também se visou um mínimo de 500 (quinhentos) quilogramas de massa no somatório dos PO's. Assim como alguns dados acerca do número de PO's, alguns dados da quantidade de massa usada nos PO's foram perdidos. Da mesma forma, para que não atrapalhasse na avaliação, foram retirados do modelo em algumas campanhas.

#### **4.2.7 Número de Trincas durante a campanha**

Trincas são altamente prejudiciais, pois trazem intervalo de forno fechado e necessidade de consumo excessivo de massa para correção. Assim, definiu-se o seu valor máximo ideal em uma campanha como 2 (dois).

#### **4.2.8 Desvio da Injeção de Massa (toneladas)**

O desvio de injeção de massa em uma corrida deve ser de no máximo 40 (quarenta) quilogramas. Usando os valores de número ideal de corridas diárias (3,78) e número ideal de dias de operação, tem-se que:

$$d_{im} = 40 \times 3,78 \times 28 = 4.233,6 \text{ mil toneladas}$$

Aliado à algumas médias de desvio de massa encontradas, definiu-se que o desvio máximo de massa deve ser igual a 5 (cinco) toneladas.

#### **4.2.9 Número de Corridas durante a Campanha**

Multiplicando número ideal de dias para uma campanha e número ideal de corridas diárias, tem-se que o número ideal de corridas durante uma campanha é de 106,11. Eliminando os

valores de campanhas mais baixas, e avaliando a média, definiu-se que o intervalo ideal de dias de uma campanha é entre 100 (cem) e 120 (cento e vinte).

#### **4.2.10 Consumo Total de Massa na Campanha (toneladas)**

Baseado em dados de fornecedores, definiu-se o consumo específico (CE) ideal de massa sendo entre 0,33 e 0,37. Consumos específicos muito baixos são ruins, pois o furo não é obturado com a quantidade ideal de massa. Consumos específicos muito altos são ruins, pois indicam que está gastando mais massa que o visado para os fechamentos, gerando um custo maior. Consumo específico é calculado da seguinte forma:

$$CE = \frac{\text{consumo total de massa (toneladas)}}{\text{produção da campanha (mil toneladas)}}$$

#### **4.2.11 Número de Retorno de Massa**

Retornos de massa são ruins, pois não vedam o furo corretamente e podem trazer até arrombamentos. O retorno de massa traz a necessidade de um PO que troca a massa do furo, fazendo a obturação correta. Isso traz um maior consumo e, em grandes quantidades, traz maiores problemas de segurança e custo. Com isso, definiu-se seu valor máximo ideal como 4 (quatro).

#### **4.2.12 Número de Eventos de Retenção de Escória**

A retenção de escória é prejudicial, pois aumenta o nível de líquidos no cadinho e prejudica o esgotamento do forno. Considerando a moda dos valores desse parâmetro em alguns furos de gusa, foi definido seu valor máximo ideal como 5 (cinco).

#### **4.2.13 Número de Corridas Consecutivas**

Corridas consecutivas são altamente prejudiciais, como citado anteriormente. Visto isso, entende-se que não devem haver corridas consecutivas em um mesmo furo. Apesar de toda a preparação, alguns problemas, como aumento do nível térmico do forno, trazem a sua necessidade, então limita-se seu valor ótimo a 1 (um).

#### 4.2.14 Número de Interrupções de Corrida

Interrupções de corrida, como explicado anteriormente, podem ser fruto de descida rápida de líquidos ou então trincas no cogumelo. Aliando as médias dos valores das campanhas de cada furo, seu valor máximo foi definido como 11 (onze).

#### 4.2.15 Média do Índice de Escória

Como é um dado operacional já usado na empresa, seu valor mínimo ideal manteve-se definido como 0,92. O índice de escória se define como a fração de tempo de corrida em que vazam simultaneamente escória e gusa.

#### 4.2.16 Campanha Ótima de um Furo de Gusa

Após definição de cada parâmetro, foi definido como “Campanha Ótima” de um Furo de Gusa” a campanha que contemple todos os parâmetros, como mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Campanha Ótima de um Furo de Gusa.

PARÂMETROS	ACERTO
1 - Tempo de Campanha (dias)	26 a 30
2 - Média Tempo de Corrida (minutos)	170 a 190
3 - Intervalo Forno Fechado (minutos)	$\leq 60$
4 - Média do Comprimento do FG (milímetros)	3100 a 3400
5 - Número de PO's para entrada do Canal	2 a 3
6 - Somatório de massa nos PO's (quilogramas)	$\geq 500$
7 - Número de Trincas durante a campanha	$\leq 2$
8 - Desvio da Injeção de Massa (toneladas)	$\leq 5$
9 - Número de Corridas durante a Campanha	100 a 120
10 - Produção da Campanha (mil toneladas)	$\geq 95$
11 - Consumo Total de Massa na Campanha (toneladas)	CE entre 0,33 e 0,37
12 - Número de Retorno de Massa	$\leq 4$
13 - Número de Eventos de Retenção de Escória	$\leq 5$
14 - Número de Corridas Consecutivas	$\leq 1$
15 - Número de Interrupções de Corrida	$\leq 11$
16 - Média do Índice de Escória	$\geq 0,92$

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Aplicando o modelo descrito anteriormente, foram avaliadas as campanhas de todos os furos dos anos de 2021 e 2022. Para que fosse avaliada, definiu-se como data máxima de conclusão da campanha como 10 de agosto de 2022. Dessa forma, campanhas em andamento no momento de finalização desse trabalho não foram avaliadas e sugere-se que, após a finalização de cada campanha, seja utilizado esse método para suas respectivas avaliações. Após avaliadas, as campanhas foram ranqueadas da melhor para a pior por furo de gusa, como mostrado nas tabelas 5.1 a 5.4.

Tabela 5.1 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 1

<b>FURO DE GUSA 1</b>		
<b>Posição</b>	<b>Campanha</b>	<b>Nota</b>
1°	10	10
2°	7	8
3°	1	7
4°	2	7
5°	3	7
6°	8	7
7°	9	6
8°	4	5
9°	5	5
10°	6	5

Tabela 5.2 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 2

<b>FURO DE GUSA 2</b>		
<b>Posição</b>	<b>Campanha</b>	<b>Nota</b>
1°	13	13
2°	12	10
3°	10	9
4°	1	8
5°	7	8
6°	11	8
7°	3	7
8°	4	7
9°	6	7
10°	9	7
11°	2	6
12°	5	4
13°	8	3

Tabela 5.3 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 3

<b>FURO DE GUSA 3</b>		
<b>Posição</b>	<b>Campanha</b>	<b>Nota</b>
1°	3	10
2°	11	10
3°	1	9

4°	4	9
5°	2	8
6°	5	8
7°	10	8
8°	9	7
9°	7	5
10°	8	5
11°	6	4

Tabela 5.4 – Identificação e Ranking das campanhas do furo de gusa 4

<b>FURO DE GUSA 4</b>		
<b>Posição</b>	<b>Campanha</b>	<b>Nota</b>
1°	5	10
2°	11	9
3°	2	8
4°	3	8
5°	4	7
6°	9	7
7°	1	6
8°	7	6
9°	8	5
10°	10	5
11°	6	4

Como visto acima, a campanha 13 (treze) do segundo furo obteve a melhor avaliação, conseguindo contemplar 13 (treze) dos 16 (dezesesseis) critérios. Os critérios de acordo com os quais a campanha não foi bem-sucedida foram dias de operação, número de corridas e consumo de massa durante a campanha.

O consumo de massa desta campanha ficou em 0,328, valor que é muito próximo do limite mínimo de 0,33 que se tem para o consumo específico de massa em uma campanha. Essa campanha se deu em 31 (trinta e um) dias, acima do valor máximo estipulado (30) e teve 125 (cento e vinte e cinco) corridas, acima do valor máximo estipulado (120).

Avaliando a união dos outros dois parâmetros que ficaram fora dos critérios, pode-se dizer que, devido ao número de dias de campanha, a campanha necessitou de mais corridas para produzir acima do limite mínimo e, mesmo assim, o número de corridas a mais foi apenas cinco acima do limite superior do critério. O tempo médio de corridas dessa campanha de

181 (cento e oitenta e um) minutos (dentro do intervalo visado entre 170 minutos e 190 minutos), o que mostra que não se teve muitos eventos de corrida curta que atrapalharam a campanha.

O comprimento médio do furo de gusa nessa campanha foi de 3.191 (três mil cento e noventa e um) milímetros (dentro da faixa estipulada, de 3.100 milímetros a 3.400 milímetros), isso mostra que a injeção de massa foi altamente satisfatória. O número de POs e a quantidade de massa prepararam bem a área para sua entrada em operação e a injeção, com apenas 4,8 mil toneladas de desvio (abaixo do máximo estipulado, 5 toneladas), conseguiu manter um comprimento satisfatório durante toda a campanha. Essa boa injeção também levou a um baixo número de interrupções de corrida, mesmo sem o uso de massa veda-trinca.

A união dos critérios de tempo médio de corridas, bom comprimento médio do furo e alta produção pode-se dar em conta da manutenção do uso da broca de 55 milímetros de diâmetro durante grande parte da campanha, o que levou a uma boa drenagem do cadinho. Essa boa drenagem pode ser vista também através dos critérios de número de retenções de escória e média do índice de escória, que se mantiveram dentro do limite avaliado como bom na campanha.

Com isso, a campanha 13 do furo de gusa 2 é tida como a melhor campanha de um furo de gusa, de acordo com os critérios adotados. As campanhas com nota 10 (dez) que se aproximam desse modelo foram avaliadas como boas, as campanhas com nota 9 (nove) ou 8 (oito) foram avaliadas como regulares, enquanto campanhas com nota menor ou igual a 7 (sete) foram avaliadas como ruins.

O furo de gusa 3 teve duas campanhas com nota 10 (3 e 11). A campanha 11 não teve bom tempo de corrida (192 min, acima do limite superior definido em 190 min), bem como o número de corridas e o intervalo de forno fechado durante a campanha se desviaram das metas (acima dos limites superiores estipulados de 120 corridas e 60 minutos, respectivamente), mas, apesar disso, a sua produção foi boa (acima de 90 mil toneladas), o que mostra que o cadinho foi bem drenado, porém com dificuldades. Isso pode ser visto por meio dos parâmetros de índice de escória e dias de operação. O alto tempo médio de duração das corridas foi atingido usando uma broca maior (58 milímetros) que o padrão (55 milímetros), mostrando que o nível de líquidos e a produção estavam altas, fatores que também afetaram o número de corridas. A injeção de massa foi boa, pois o desvio (5,12 toneladas) se aproximou do limite de 5 toneladas, consumo foi razoável (0,31; abaixo do limite inferior de 0,33), o que manteve a média de comprimento dentro do visado (entre 3100

e 3400). Para essa campanha, a correção dos POs que tiveram pressão alta foram fundamentais para que um comprimento mínimo, apesar de baixo, fosse atingido na primeira campanha.

Enquanto isso, a campanha 3, apesar de atingir as metas quanto ao índice de escória, retenção de escória, número de corridas consecutivas, comprimento médio das campanhas e intervalo de forno fechado, não podem ser consideradas campanhas satisfatórias, pois não drenou bem o cadinho. Isso pode ser visto através dos critérios de tempo médio de corridas, tempo da campanha, produção e consumo de massa. Nessa campanha, não houve dificuldade de controlar os retornos de massa (abaixo de 5) e manter o comprimento (entre 3100 e 3400), mas isso trouxe alto custo ao processo, que não foi compensado com uma boa produção (abaixo de 90 mil toneladas).

A campanha 10 do furo de gusa 1 não atingiu o tempo de intervalo de forno fechado (ficou acima do limite de 60 minutos) devido ao alto número de consecutivas por manutenção de equipamentos (problemas vistos desde o PO de entrada da área) e, com isso, foram necessárias mais corridas e dias (7 corridas e 2 dias a mais que o limite superior) para atingir o critério de produção. Apesar dos retornos de massa, a manutenção do comprimento foi atingida devido ao correto número de POs (dois ou três) e quantidade de massa, o que também manteve o consumo específico de massa dentro do ideal (entre 0,33 e 0,37). Com isso, apesar de se igualar em nota com a campanha 3 do furo 3, essa pode ser considerada uma campanha melhor.

A campanha 12 do furo de gusa 2 é bastante similar a 10 do furo de gusa 1. O que as diferencia é o número de corridas consecutivas (não houve), que não trouxe altos intervalos de forno fechado. Essa campanha também traz similaridades com a campanha 11 do furo de gusa 3, pois a necessidade de correção dos POs trouxe um comprimento inicial razoável e, apesar da dificuldade de injeção de massa (5,5 toneladas de desvio), o comprimento foi mantido dentro do ideal (entre 3100 e 3400) e o consumo específico de massa também (entre 0,33 e 0,37). Assim como a campanha 10 do furo de gusa 1, essa campanha é melhor que outras que tem a mesma nota.

A campanha 5 do furo de gusa 4 é bastante similar à campanha 3 do furo de gusa 3. Enquanto critérios de retenção de escória, consecutivas, retorno de massa, comprimento, etc., atingem os parâmetros ideais, número de corridas, tempo médio de corridas, tempo de campanha, produção e índice de escória não são satisfatórios, o que leva a uma campanha ruim. Essa

campanha é pior avaliada que as campanhas 12 (furo de gusa 2) e 10 (furo de gusa 1) e está no mesmo nível que a campanha 3 (furo de gusa 3), apesar de terem, no final, mesma nota. Os bons resultados em produção, consumo específico de massa, tempo médio de corridas e baixo intervalo de forno fechado, levam as campanhas (destacadas em laranja nas tabelas 5.1 a 5.4) a uma boa drenagem do gusa no cadinho, apesar do alto número de retenções de escória e à baixa média de índice de escória. Essas campanhas são caracterizadas também pela boa injeção de massa, pois os critérios de consumo específico, quantidade de massa nos POs (apesar do número de POs) e desvio de injeção levam à manutenção do comprimento médio dentro do intervalo considerado ideal. Com isso, apesar de, em nota, essas campanhas estarem pior avaliadas que as campanhas que obtiveram nota 10, algumas dessas campanhas podem ser consideradas melhores que as campanhas 3 (furo de gusa 1) e 5 (furo de gusa 4). As campanhas em destaque vermelho nas tabelas 5.1 a 5.4 podem, como um todo, podem ser consideradas campanhas muito ruins. Apesar de algumas atingirem critérios de comprimento médio do furo de gusa, os altos números de retornos de massa, alto desvio na injeção de massa, alto número de trincas e alto número de POs mostram que a injeção de massa encontrou alta dificuldade e foi caracterizada mais por correções de eventos insatisfatórios. Isso também reflete no intervalo de forno fechado, pois esses eventos, aliado à baixa média de tempo de corridas, mostra que houve uma discrepância grande no tempo de corrida entre as corridas da campanha, o que levou à uma drenagem dificultosa do cadinho.

Com isso, vê-se que se deve ter atenção especial aos equipamentos durante a preparação da entrada da área e durante a operação. A falta de manutenção no canhão antes da realização dos POs de entrada pode trazer dificuldades na preparação do furo de gusa, enquanto problemas no canhão e perfurador podem levar a manutenções corretivas, que podem levar à necessidade de corridas muito longas ou consecutivas, visando obter tempo hábil para correção desses problemas. Sugere-se que sejam feitas inspeções do equipamento a cada turno para que esses cenários sejam evitados.

A correção da quantidade de massa nos POs feita através da realização de mais POs devido à falta de injeção em alguns pode ser um método de conseguir bons comprimentos na entrada do canal. Com isso, fica mais fácil de se atingir bons tempos iniciais de corrida. O comprimento médio das corridas é atingido com a boa injeção de massa que, particularmente na campanha 13 (furo de gusa 2), foi atingido com uma massa que tinha índice de extrusão maior, trazendo boa compactação e vedação do furo de gusa.

Para a boa drenagem do cadinho, devem ser avaliados o intervalo entre aberturas e a broca usada. Viu-se que a broca de 55 milímetros (dentro do padrão), trouxe boa produção e facilidade na injeção de massa. Entretanto, níveis de produção mais altos exigiram maiores tempos de corrida e um aumento no diâmetro da broca. Por isso, também deve ser levada em conta a constância no uso de determinada broca, que pode trazer benefícios, como manutenção de comprimento, ou até malefícios, como aumento no tempo de forno fechado. A tabela 5.5 mostra quais parâmetros têm maior frequência como causa de insucesso em cada furo de gusa. A partir dela, nota-se que “Tempo de campanha”, “Intervalo de Forno fechado”, “Número de POs para entrada do canal”, “Somatório de massa nos POs”, “Número de corridas durante a campanha”, “Consumo Total de Massa na campanha”, “Número de Corridas consecutivas” e “média do índice de escória” merecem maior atenção em todos os furos.

Tabela 5.5 – Frequência de causa de insucesso por furo de gusa

<b>PARÂMETRO</b>	<b>FURO DE GUSA</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Tempo de Campanha</b>	5	7	7	7
<b>Média Tempo de Corrida</b>	4	7	7	6
<b>Intervalo Forno Fechado</b>	10	8	5	10
<b>Média do Comprimento do FG</b>	1	5	3	5
<b>Número de PO's para entrada do Canal</b>	9	8	7	7
<b>Somatório de massa nos PO's</b>	6	9	6	6
<b>Número de Trincas durante a campanha</b>	4	4	4	4
<b>Desvio da Injeção de Massa</b>	5	5	5	6
<b>Número de Corridas durante a Campanha</b>	8	11	10	9
<b>Produção da Campanha</b>	6	8	7	6
<b>Consumo Total de Massa na Campanha</b>	7	11	6	8
<b>Número de Retorno de Massa</b>	7	6	5	5
<b>Número de Eventos de Retenção de Escória</b>	6	5	5	6
<b>Número de Corridas Consecutivas</b>	7	8	4	6
<b>Número de Interrupções de Corrida</b>	4	1	6	5
<b>Média do Índice de Escória</b>	5	8	6	5

A alta frequência de insucessos relativos aos parâmetros de “Intervalo de Forno Fechado” e “Número de Corridas” pode estar relacionada a corridas muito curtas nos furos. A manutenção em equipamentos também pode diminuir a quantidade de corridas devido ao atraso na abertura da área oposta e ou até necessidade de corrida consecutiva (parâmetro “Número de Corridas consecutivas”), e conseqüentemente, aumento do tempo da corrida em si, o que abaixa o nível de líquidos naquela região e pode trazer mais corridas curtas posteriormente. O consumo específico de massa pode aumentar com o aumento do número de corridas e isso pode aumentar o custo de produção. “Tempo de operação” maior em um furo traz maior tempo fora de operação em um furo adjacente e isso aumenta a carga inativa acima desse furo fora de operação, o que traz distúrbios ao processo. Como dito anteriormente, a necessidade de correção dos POs devido à falta de massa pode auxiliar o ganho de comprimento em um início de operação e é recomendado em alguns casos, mas pode ser evitado com a realização do PO pouco tempo após a abertura da área que está em operação.

## **6 CONCLUSÕES**

Um modelo de avaliação de campanha foi criado, o que permitiu identificar a melhor campanha, Campanha 13.

As campanhas avaliadas como “boas” e “regulares” a partir desse modelo merecem uma segunda avaliação, pois os critérios avaliados, mesmo indicando uma boa campanha, podem mostrar uma drenagem ruim do cadinho.

Correção dos PO's, inspeção constante dos equipamentos de esgotamento, alteração no diâmetro da broca, parecem recomendáveis para que uma melhor campanha seja atingida. Essas ações devem ser feitas durante a operação e não foi possível avaliar sua efetividade em razão do pouco tempo hábil para a finalização desse trabalho.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como, apesar de mesma nota, algumas corridas serem avaliadas como melhores que outras, sugere-se um refino do sistema utilizando pesos maiores para parâmetros mais importantes. Além disso, campanhas com dados faltantes podem ser eliminadas de modo que não causem distúrbios na avaliação.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, A.; AGRAWAL, M. K.; GHOSH, U.; KOTHARI, A. K.; KUMAR, J.; KUNDU, S.; MURTHY, G. S. R.; PRASAD, B.; TIWARI, M.; TRIPATHI, V. R.; VISHWAKARMA, R. K. Improvement in casting practice by controlling the drainage rate and hearth liquid level to develop an efficient casthouse management practice in blast furnace. **Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications**, v. 46, n. 4, p. 373-382, 2017.

ARIYAMA, T.; NOUCHI, T.; SATO, M.; TAKEDA, K. Effects of Operation Condition and Casting Strategy on Drainage Efficiency of the Blast Furnace Hearth. **ISIJ International**, v. 45, n. 10, p. 1515-1520, 2005.

BODEVING, C.; CRUZ, D. B. M.; FLAMMANG, M.; KRUESSMANN, M. TMT-BBG HS 600 – Optimization of taphole drilling in economical and performance points of view. In: ABM Week, 2ª ed., 2016, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**, Rio de Janeiro: Blucher Proceedings, 2016, p. 369-373.

BURGESS, J. M.; PINCZEWSKI, W. V.; TANZIL, W. B. U.; ZULLI, P. Experimental Model Study of the Physical Mechanisms Governing Blast Furnace Hearth Drainage. **Transactions ISIJ**, v.24, p. 197-205, 1984.

EVANS, G.; HE, Q.; TANZIL, F.; ZULLI, P. Cold Model Study of Blast Gas Discharge from the Taphole during the Blast Furnace Hearth Drainage. **ISIJ International**, v. 52, n. 5, p. 774-778, 2012.

EVANS, G.; HE, Q.; TANZIL, F.; ZULLI, P. Flow Characteristics of a Blast Furnace Taphole Stream and Its Effects on Trough Refractory Wear. **ISIJ International**, v. 42, n. 3, p. 235-242, 2002.

FUKUTAKE, T.; MATSUMOTO, T.; TSUCHIYA, N.; YAMAUCHI, Y. In-furnace Conditions as Prerequisites for Proper Use and Design of Mud to Control Blast Furnace Taphole Length. **ISIJ International**, v. 38, n. 2, p. 116-125, 1998.

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

GEYER, P. G.; HALIFA, Z. Blast furnace tapping practice at ArcelorMittal

South Africa, Vanderbijlpark Works. In: FURNACE TAPPING CONFERENCE, 2014, Muldersdrift, África do Sul. **Proceedings [...]**, Johannesburgo: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2015, p. 97-112.

HAKONE, T.; IIDA, M.; OGURA, K. Analysis of Drainage Rate Variation of Molten Iron and Slag from Blast Furnace during Tapping. **ISIJ International**, v. 48, n. 4, p. 412-419, 2008.

HAUCK, T.; KAYMAK, Y.; RAUSCH, H. Simulation of Slag/Gas and Slag/Iron Interface Tilting in Blast Furnace Hearth during Slag Tapping. In: COMSOL Multiphysics, 2017, Rotterdam. **Proceedings [...]**, Rotterdam: COMSOL AB, 2016. 5 p. Disponível em: <https://www.comsol.com/paper/simulation-of-slag-gas-and-slag-iron-interface-tilting-in-blast-furnace-hearth-d-49851>. Acesso 02.mai.2022

HE, Q.; STEVENSON, P. Slug flow in a blast furnace taphole. **Chemical Engineering and Processing**. v. 44, p. 1094-1097, 2005.

ICHIDA, M.; KURITA, Y.; OOTSUKA, H.; SHINOTAKE, A. **Floating/Sinking of Deadman and Liquid Flow Behavior in Blast Furnace Hearth**. Nippon Steel Technical Report, Tóquio: 2006. 7p. Disponível em <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9419.pdf>. Acesso 16.jul.2022.

INABA, S.; KIMURA, K.; SHIBATA, K.; SHIMIZU, M. Dynamics of Dead-man Coke and Hot Metal Flow in a Blast Furnace Hearth. **ISIJ International**, v. 30, n. 3, p. 208-215, 1990.

INADA, T.; IWANAGA, Y.; SUNAHARA, K. Size degradation of dead-man coke by reaction with molten FeO in blast furnace. **Tetsu-to-Hagané**, v. 78, n. 7, p. 1156-1163, 1992.

ITO, T.; NAGAMUNE, A.; YOTSUJI, J. Development of Pig Iron and Molten Slag Level Measurement Technique for Blast Furnace. **ISIJ International**, v. 54, n. 11, p. 2618-2622, 2014.

KUNDU, T.; UPADHYAY, H. Drain Rate and Liquid Level Simulation in Blast Furnace Hearth Using Plant Data. **International Scholarly Research Notices**, v. 2013, Artigo ID 960210, 7 p., 2013.

KURUNOV, I. F.; LOGINOV, V. N.; TIKHONOV, D. N. Methods of extending a blast-furnace campaign. **Metallurgist**, v. 50, n. 11-12, p. 605-613, 2006.

MAEDA, T.; NISHIOKA, K.; SHIMIZU, M. A Three-dimensional Mathematical Modelling of Drainage Behavior in Blast Furnace Hearth. **ISIJ International**, v. 45, n. 5, p. 669-676, 2005.

MAEDA, T.; NISHIOKA, K.; SHIMIZU, M. Effect of Various In-furnace Conditions on Blast Furnace Hearth Drainage. **ISIJ International**, v. 45, n. 10, p. 1496-1505, 2005.

NOUCHI, T.; TAKEDA, K.; YASUI, M. Effects of Particle Free Space on Hearth Drainage Efficiency. **ISIJ International**, v. 43, n. 2, p. 175-180, 2003.

OHARA, K.; OMORI, H.; SHIMOMURA, K.; UENAKA, T.; YORITA, E.; YULUBO, Y. An evaluation method of taphole mud for blast furnace. **Shinagawa Technical Report**, n. 32, p. 29-44, 1989.

POST, J. R.; TOGNARELLI, D.; STEL, J.; REUTER, M. A. Hot metal flow in the hearth of a blast furnace: influence of dynamic changes dead man porosity due to coke dissolution and coke size changes. In: Jernkontoret (ed.). 5TH EUROPEAN COKE AND IRONMAKING CONGRESS, 2005, Estocolmo, Suécia. **Proceedings [...]**, Estocolmo: Swedish Steel Producers' Association, 2005, p. 1-16.

RAIPALA, K. **On Hearth Fenomena and Hot Metal Carbon Content in Blast Furnace**. 2003. 86f. Dissertação. Doutorado de Ciência em Tecnologia, Universidade de Tecnologia, Espoo, Finlândia, 2003.

RESEARCH FUND FOR COAL AND STEEL. **Blast furnace sustained tapping practice (SUSTAINTAP)**. Comissão Europeia. Bruxelas: 2016. 209 p. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a4214739-9a89-11e6-9bca-01aa75ed71a1>. Acesso 26.abr.2022

RESEARCH FUND FOR COAL AND STEEL. **Improvement of hearth drainage efficiency and refractory life for high BF productivity and a well-adjusted reductant injection rate at varying coke quality (HEARTH EFFICIENCY)**. Comissão Europeia. Bruxelas: 2012. 222p. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1c6bfd51-2cfd-4ba9-8bf9-288a32fee6a4/language-en>. Acesso 23.jul.2022

SAFFMAN, P. G.; TAYLOR, G. I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. **The Royal Society**, v. 245, p. 312 – 329, 1958.

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.

SAXÉN, H.; SHAO, L. A Simulation Study of Two-liquid Flow in the Taphole of the Blast Furnace. **ISIJ International**, v. 53, n. 6, p. 988-994, 2013.

SAXÉN, H.; SHAO, L. Model of Blast Furnace Hearth Drainage. **Steel Research International**, v. 83, n. 2, p. 197-204, 2012.

ZHANG, F. Design and Operation Control for Long Campaign Life of Blast Furnaces. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 20, n .9, p. 53-60, 2013.

## 9 ANEXOS

Tabela 9.1 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 1

Campanha	Tempo de Operação (dias)	Tempo de Corrida (min)	Intervalo de Forno fechado (min)	Média do Comprimento do FG (mm)	Número de PO's para entrada do Canal	Somatório de massa nos PO's (kg)	Número de Trincas durante a campanha	Desvio da Injeção de Massa (t)	Número de Corridas durante a Campanha	Produção da Campanha (kt)	Consumo Total de Massa na Campanha (t)	Número de Retorno de Massa	Número de Eventos de Retenção de Escória	Número de Corridas Consecutivas	Número de Interrupções de Corrida	Média do Índice de Escória
1	28	186	107	3163			6	-0,116	47	83,283	25,401	2	12	0	3	0,9
2	29	174	129	3149	4	1488,5	7	-1,719	122	80,12	27,552	5	11	2	9	0,897
3	28	155	224	3250	2	973	1	-2,558	137	91,272	26,965	2	16	4	16	0,871
4	29	160	152	3217			1	-5,983	117	77,923	24,589	1	11	4	13	0,88
5	23	156	85	3280			0	-3,807	112	77,124	21,751	6	11	2	7	0,874
6	39	166	194	3196	4	202	9	-8,05	156	113,312	33,422	8	5	5	8	0,93
7	36	171,5	88	3135,5			1	-10,19	134	98,329	29,431	9	2	1	10	0,95
8	35	181	98	3422	4	941	2	-5,915	134	110,914	36,504	12	5	1	14	0,94
9	30	171	206	3206	4	1032	7	-5,994	130	94,21	33,216	10	10	2	17	0,94
10	32	175,6	114	3248	4	1088	1	-2,81	127	95,69	31,922	5	3	2	9	0,95

Tabela 9.2 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 2

Campanha	Tempo de Operação (dias)	Tempo de Corrida (min)	Intervalo de Forno fechado (min)	Média do Comprimento do FG (mm)	Número de PO's para entrada do Canal	Somatório de massa nos PO's (kg)	Número de Trincas durante a campanha	Desvio da Injeção de Massa (t)	Número de Corridas durante a Campanha	Produção da Campanha (kt)	Consumo Total de Massa na Campanha (t)	Número de Retorno de Massa	Número de Eventos de Retenção de Escória	Número de Corridas Consecutivas	Número de Interrupções de Campanha	Média do Índice de Escória
1	28	180	75	3135			3	3,066	119	90,317	30,971	2	10	3	8	0,91
2	3	135		2675			0	-1,172	13	3,278	2,781	0	3	12	0	0,68
3	26	174	117	3240	3	648	6	2,253	116	77,493	31,161	7	11	2	16	0,89
4	28	162	191	3079	2	557	0	-8,424	139	96,81	28,679	4	8	2	7	0,91
5	14	168	69	3072			0	-5,331	63	42,634	13,224	2	0	3	0	0,89
6	2	131	5	3033			0	-0,519	9	4,965	1,995	1	0	0	1	0,88
7	5	162	12	3148			0	-2,408	24	15,225	4,26	1	1	0	0	0,88
8	26	150	152	3120	4	412	4	-5,497	135	92,256	34,71	6	14	5	4	0,88
9	29	167	111	3206	2		6	-1,158	127	90,246	33,78	9	6	1	10	0,93
10	36	179	143	3132			2	-3,866	140	103,147	38,066	10	3	6	10	0,93

11	36	190	106	3092	2	757	1	-5,574	143	124,354	46,713	16	5	4	7	0,96
12	30	177	52	3161	5	414	0	-5,517	127	95,269	35,964	8	3	0	6	0,96
13	31	181	40	3191	2	645	1	-4,821	125	97,123	31,976	4	3	0	5	0,95

Tabela 9.3 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 3

Campanha	Tempo de Operação (dias)	Tempo de Corrida (min)	Intervalo de Forno fechado (min)	Média do Comprimento do FG (mm)	Número de PO's para entrada do Canal	Somatório de massa nos PO's (kg)	Número de Trincas durante a campanha	Desvio da Injeção de Massa (t)	Número de Corridas durante a Campanha	Produção da Campanha (kt)	Consumo Total de Massa na Campanha (t)	Número de Retorno de Massa	Número de Eventos de Retenção de Escória	Número de Corridas Consecutivas	Número de Interrupções de Corrida	Média do Índice de Escória
1	20		54	3208			1	0,11	79	58,134	17,161	0	4	1	1	0,91
2	6	28	40	3129			0	-0,251	24	15,324	5,243	0	2	2	1	0,84
3	22	16	50	3194			2	2,595	84	56,229	21,924	3	5	0	8	0,92
4	28	26	39	3190	2	932	4	-4,875	134	86,486	26,44	5	5	0	23	0,93
5	4	48	21	3316			0	-0,82	19	12,602	3,345	0	2	0	4	0,8
6	29	11	108	3089			2	-10,725	140	94,083	32,426	4	20	3	14	0,85
7	34	27	131	3110	2	481	6	-4,239	136	100,729	36,24	6	15	6	28	0,91
8	29	29	159	2966	3	603	12	-7,986	119	92,138	12,026	17	15	4	17	0,9
9	32	36	72	3069	3	1411	4	-12,234	128	108,264	39,252	5	7	0	34	0,93
10	34	36	55	3106	5	1191	2	-12,234	124	103,563	36,826	6	7	0	15	0,93
11	27	30	81	3213	4	695	2	-5,12	122	103,408	33,065	3	5	1	9	0,95

Tabela 9.4 – Parâmetros das campanhas do furo de gusa 4

Campanha	Tempo de Operação (dias)	Tempo de Corrida (min)	Intervalo de Forno fechado (min)	Média do Comprimento do FG (mm)	Número de PO's para entrada do Canal	Somatório de massa nos PO's (kg)	Número de Trincas durante a campanha	Desvio da Injeção de Massa (t)	Número de Corridas durante a Campanha	Produção da Campanha (kt)	Consumo Total de Massa na Campanha (t)	Número de Retorno de Massa	Número de Eventos de Retenção de Escória	Número de Corridas Consecutivas	Número de Interrupções de Corrida	Média do Índice de Escória
1	18	163	74	3317			0	0,472	72	57,777	15,701	0	6	2	2	0,92
2	8	165	81	3195			1	0,262	31	19,505	6,694	1	4	0	0	0,91
3	18	186	116	3183			1	0,462	67	119,843	34,809	1	10	0	4	0,91
4	27	156	105	3222	3	734	2	-5,497	130	82,399	21,983	0	10	0	22	0,89
5	2	163	8	3154	2	840	0	-0,595	13	9,308	3,595	0	1	0	3	0,88
6	30	159	104	3090			0	-4,454	143	98,652	39,542	8	12	2	15	0,87
7	24	173	71	2994	2	455	4	-12,164	106	83,597	23,164	9	4	2	7	0,92
8	29	179	144	3041			5	-6,429	118	93,957	33,289	7	10	2	13	0,94

9	32	185	70	3063	4	676,5	2	-6,7	130	107,398	32,937	18	4	1	20	0,94
10	35	192	116	3095	3	949	8	-6,468	128	102,116	38,511	3	6	4	15	0,95
11	29	184	85	3142	4	1138	7	-6.326	122	96,327	34,306	5	4	3	10	0,96