



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA



OTÁVIO AUGUSTO GOMES E SOUZA

METODOLOGIA DE PARADA DE ALTOS-FORNOS:
ESTUDO DE CASO PARA UMA USINA SIDERÚRGICA NÃO INTEGRADA

OURO PRETO - MG
2022

OTÁVIO AUGUSTO GOMES E SOUZA

otaviosouza17@yahoo.com.br

**METODOLOGIA DE PARADA DE ALTOS-FORNOS:
ESTUDO DE CASO PARA UMA USINA SIDERÚRGICA NÃO INTEGRADA**

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

Professor orientador: Prof. Dr. Vítor de Andrade Alvarenga Oliveira

Professor coorientador: Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira

**OURO PRETO – MG
2022**



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

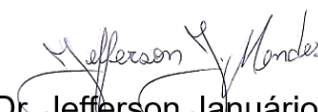


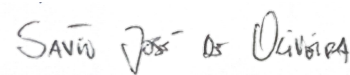
ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

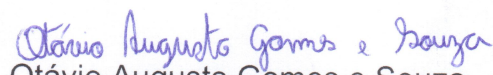
Aos 14 dias do mês de janeiro de 2022, às **17:10** horas, em uma sala virtual criada utilizando-se da plataforma Google Meet, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Otávio Augusto Gomes e Souza** sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Vítor de Andrade Alvarenga Oliveira (Orientador), Jeferson Januário Mendes (Membro) e Sávio José de Oliveira (Membro). O aluno apresentou a monografia intitulada “Metodologia de parada de altos-fornos: Estudo de caso para uma usina siderúrgica não integrada”. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 14 de janeiro de 2022.

Prof. Dr. Vítor de Andrade Alvarenga Oliveira
Orientador – Presidente (Ufop – demet)


Prof. Dr. Jeferson Januário Mendes
Membro – (IFMG-OP)


MSc. Sávio José de Oliveira
Membro – (Redemat/Demet)


Otávio Augusto Gomes e Souza
Aluno

Dedico aos meus pais, que sempre foram
minha fonte de inspiração e de propulsão.

À minha irmã, Sofia, a qual tenho amor
extremo e incondicional.

AGRADECIMENTO

A todas as pessoas que foram presentes nessa caminhada.

Àqueles que deram força nos momentos difíceis e que me mostraram que, com perseverança e insistência, os obstáculos são vencidos.

Aos amigos-irmãos da República Tarja-Preta, essenciais e 'inevitáveis' nesse meu trajeto e nesse meu processo de evolução.

Eu sou uma subjetividade, mas não sei o que sou a não ser naquilo que faço. Porque quando faço algo, eu me "reconheço", isto é, eu conheço a mim mesmo de novo.

Mario Sérgio Cortella

RESUMO

Apesar de ser um processo contínuo, a operação de um alto-forno tem, muitas vezes, que ser interrompida devido a uma infinidade de casualidades, tais como manutenções, escassez de matéria-prima, problemas financeiros e administrativos. As metodologias de parada de forno comumente encontradas na literatura, normalmente, levam em consideração altos-fornos de grande e médio porte. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo sobre os procedimentos de interrupção de funcionamento dos alto-fornos, tendo por objetivo descrever a metodologia de parada de forno de uma usina siderúrgica não integrada de pequeno porte, assim como apresentar resultados da metodologia aqui descrita. Foram coletados dados diversos sobre três paradas de forno que ocorreram no decorrer de 21 dias, sendo duas paradas programadas e uma não programada. Através da comparação dos parâmetros obtidos após as paradas de forno foi possível concluir que a aplicação prática da metodologia aqui descrita proporcionou resultados satisfatórios no que diz respeito a parâmetros como temperatura do ferro gusa, velocidade de descida de carga, permeabilidade do leito, obstrução dos algaravizes e projeção de chamas durante a operação de incendiar o topo.

Palavras-chave: Alto-Forno, Programada, Parada de forno.

ABSTRACT

Despite being a continuous process, blast furnace operation often has to be interrupted due to a multitude of casualties, such as maintenance, raw material shortages, financial and administrative problems. The blast furnace shutdown methodologies commonly found in the literature normally take into account large and medium-sized blast furnaces. In this context, this work presents a study on the blast furnace shutdown procedures, aiming to describe the blast furnace shutdown methodology for a small non-integrated steel mill, as well as to present results of the methodology applied here. Different data were collected on three blast furnace shutdowns that occurred over the course of 21 days, two of which were scheduled and one unscheduled. By comparing the parameters after the blast furnace shutdowns, it was possible to observe that the application of the methodology described here resulted in satisfactory results with regard to pig iron temperature, burden descent rate, burden permeability, obstruction of the tuyeres and flame projection during the top ignition operation.

Keywords: Blast furnace, Scheduled, Shutdown.

LISTA DE SIMBOLOS

GAF- Gás de alto-forno

VDC- Velocidade de descida de carga

M.C.A.- Metros de Coluna d'agua

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Divisões do alto-forno	3
Figura 3-2- Representação dos componentes de um glendon	5
Figura 3-3 - Procedimentos de parada de um alto-forno	5
Figura 3-4 - Sistema ternário cal-sílica -alumina	8
Figura 3-5 - Variação da composição do gás do alto-forno durante um blown down.	10
Figura 4-1- Sequência de etapas das paradas programadas.....	12
Figura 4-2 Sequência de etapas da parada não programada.....	12
Figura 4-3 - Diferentes intensidades de sopro de um alto-forno	14
Figura 4-4 – Representação da válvula de controle da pressão de trabalho do alto-forno.	15
Figura 4-5 - Etapas para reativação do alto-forno	18
Figura 5-1 - Algaravizes antes e após vedação.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 -Parâmetros visados para o carvão vegetal.....	13
Tabela 5-1 – Duração das paradas e percentual de reservas térmicas positivas	19
Tabela 5-2 - Variações de temperatura anteriormente e após as paradas de forno.....	21
Tabela 5-3 - Velocidade de descida de carga após paradas de forno	22
Tabela 5-4 - Valores registrados para vazão do ar de sopro.....	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Geral	2
2.2	Específicos	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	O Alto-Forno	3
3.2	Procedimentos Comuns de Parada de Forno	5
3.2.1	Fanning	6
3.2.2	Back drafting	6
3.2.3	Banking	7
3.2.4	Blowing out	8
3.2.5	Blowing down	9
4	METODOLOGIA	11
4.1	Estrutura da Siderúrgica	11
4.2	Paradas Programadas	11
4.2.1	Preparação do leito	13
4.2.2	Reservas térmicas positivas	13
4.2.3	Esgotamento do cadinho	14
4.2.4	Acomodação da carga e diminuição da vazão do ar de sopro	14
4.2.5	Abertura das válvulas do sistema de limpeza de gás	16
4.2.6	Desativação da Sala de Máquinas	16
4.2.7	Isolamento dos Glendons	16
4.2.8	Incendiando o Topo	16
4.3	Reativação do Alto-Forno	17
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
6	CONCLUSÕES	24
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	25

1 INTRODUÇÃO

O ferro-gusa, principal produto do alto-forno, é uma liga composta majoritariamente de ferro (92%-95%) e carbono (2,11%-5%), além de elementos como manganês, silício e enxofre, que estão presentes em menores quantidades. Como principais subprodutos do alto-forno temos a escória, o pó de balão e o GAF (Gás de alto-forno).

O principal destino do ferro-gusa produzido é a produção do aço, uma liga constituída de cerca de 98% de ferro e até 2% de carbono. Segundo Carvalho (2015), a produção do aço pode ser dividida em três etapas: redução, refino e conformação mecânica. As usinas siderúrgicas que atuam nas três etapas do processo produtivo do aço são chamadas de usinas integradas, as que atuam somente no refino e na conformação mecânica são chamadas de semi-integradas e as que atuam somente no processo de redução ou conformação mecânica são chamadas usinas siderúrgicas não integradas.

Os altos-fornos de usinas siderúrgicas não-integradas normalmente são de pequeno porte, possuindo volume útil inferior a 300m^3 e, geralmente contam com regeneradores do tipo glendon.

Aproximadamente 22 % de todo ferro-gusa produzido no Brasil, no ano de 2019, foi produzido em altos-fornos movidos à carvão vegetal, sendo que aproximadamente 2/3 desse valor foi produzido por usinas siderúrgicas não integradas. (SINDIFER, 2020).

Apesar de ser um processo contínuo, a operação de um alto-forno tem muitas vezes que ser interrompida devido a uma infinidade de casualidades, tais como manutenções, escassez de matéria-prima, problemas financeiros e administrativos. As metodologias de parada de forno presentes na literatura, normalmente, levam em consideração altos-fornos de grande e médio porte. A aplicação desses procedimentos em altos-fornos de pequeno porte nem sempre é viável, necessitando assim de adaptações dos processos previamente estabelecidos.

Nesse contexto, este trabalho descreve uma metodologia para efetuar uma parada de forno de curta duração para uma usina siderúrgica não integrada e apresenta resultados da aplicação prática da mesma.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Descrever a metodologia de parada de um alto-forno de uma usina siderúrgica não integrada.

2.2 Específicos

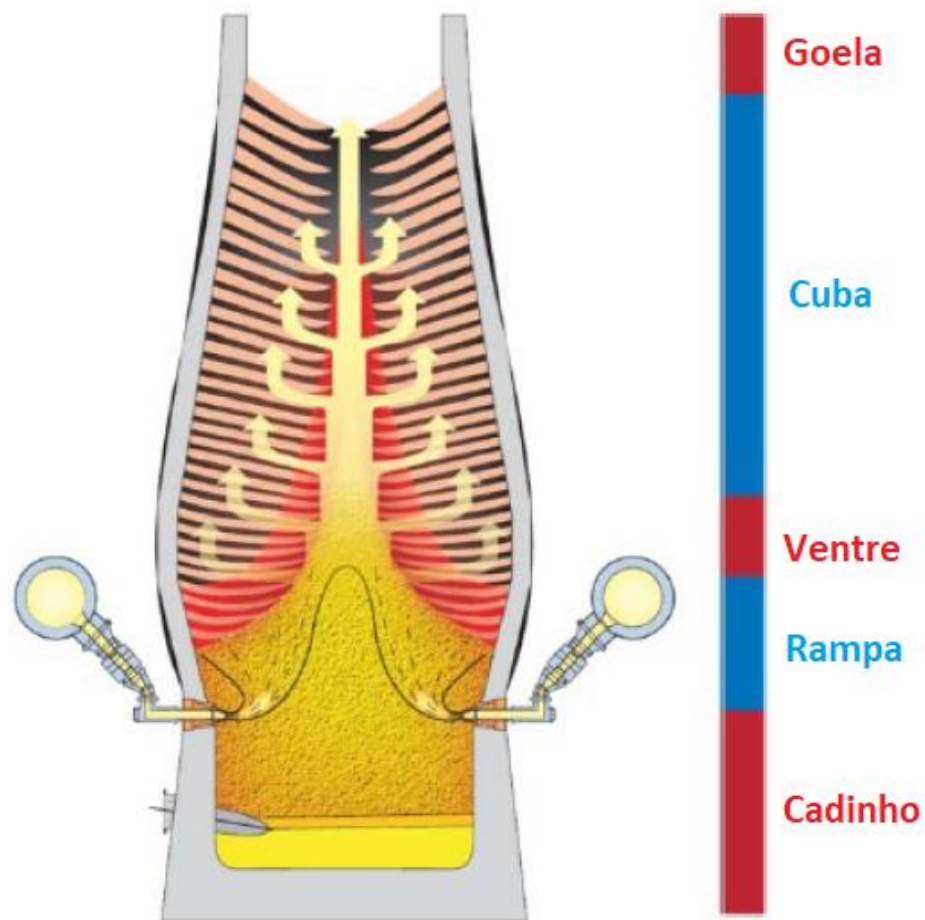
- Analisar a eficácia da metodologia descrita em relação aos seguintes parâmetros:
 - temperatura do ferro gusa após a parada do alto-forno;
 - vazão do ar de sopro após a parada do alto-forno;
 - vazão do ar de sopro após a parada do alto-forno
 - projeção de chamas durante a operação de incendiar o topo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O Alto-Forno

Segundo Mourão (2007), a estrutura do alto-forno em si pode ser dividida em regiões, sendo estas: goela, cuba, ventre, rampa e cadinho, como indicado na Figura 3.1.

Figura 3-1 - Divisões do alto-forno



Fonte: Adaptado de Geerdes (2009)

A goela é a região onde é feito o carregamento e distribuição de carga do alto-forno. Também nesta região estão localizados sondas e medidores que permitem aferir o nível da carga no interior do forno e a temperatura dos gases produzidos que saem pelo topo.

Abaixo da goela está localizada a região conhecida como cuba. Nesta região, de formato troncocônico, há a presença de carga semifundida que desce lentamente em direção a parte inferior enquanto ganha temperatura e volume.

Entre a cuba e a rampa está localizado o ventre do alto-forno. Nesta região está localizada a zona coesiva, região onde ocorre o amolecimento e fusão da carga metálica.

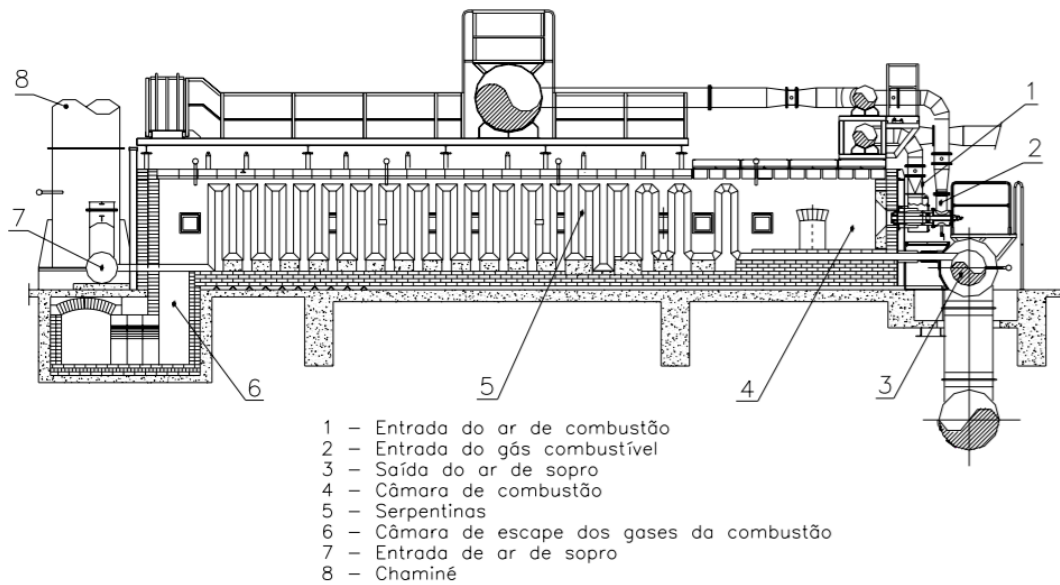
A região conhecida como rampa, assim como a cuba, possui formato tronco cônico, porém tendo seu maior diâmetro na parte superior. A função é a de sustentar a carga e permitir que haja o gotejamento de gusa e escória para o cadinho.

O cadinho está localizado na porção mais baixa do forno. Esta região de formato cilíndrico tem a função de armazenar o ferro gusa e a escória presentes em estado líquido no interior do forno até o momento exato de serem vazados.

No topo do forno também temos um sistema de tubulações chamadas de *uptakes* e *downcomer*. Estas tubulações têm como função levar o gás carregado de partículas do alto forno para o coletor de pó, onde são depositadas as partículas mais pesadas. Do coletor de pó, o gás vai para o lavador de gás, onde através de *venturis* partículas mais finas são removidas. O gás carregado de umidade é então direcionado para um desumidificador, onde o haverá a retirada da umidade excessiva do gás.

O gás de alto-forno ou "GAF" é normalmente composto por: CO (21%-31%), H₂ (1,5 % - 3,5 %), N₂ (50 % - 60 %), CO₂ (8 % - 23 %) e H₂S (~ 2,7 %). Esse gás possui poder calorífico da ordem de 800 Kcal/Nm³ e é utilizado como fonte de calor em equipamentos chamados de regeneradores. Turbo-sopradores injetam ar frio que é aquecido ao passar pelos regeneradores e entram no alto-forno através dos algaravizes para realizarem os devidos processos de redução do minério. A Figura 3.2 apresenta uma esquematização dos componentes de um regenerador do tipo glendon.

Figura 3-2- Representação dos componentes de um glendon

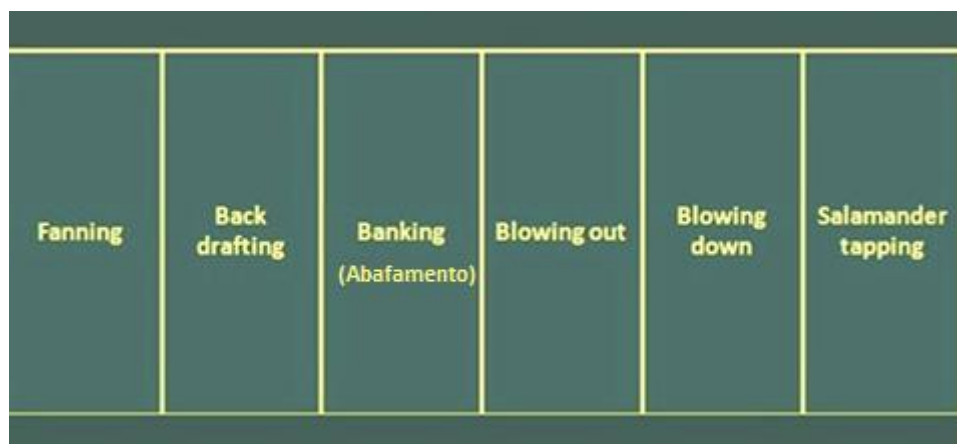


Fonte: Assunção (2006)

3.2 Procedimentos Comuns de Parada de Forno

Segundo Satyendra (2015), o tempo médio de campanha de um alto-forno é entre 15 e 20 anos. O procedimento para dar início à campanha de um alto-forno é conhecido como *blown in* e, ao final de sua campanha, um alto-forno normalmente passa por procedimentos conhecidos com *blown down* ou *blown out*. Entre o *blown in* e o *blown out/blown down* o alto-forno pode passar por diferentes tipos de paradas de curto período. Os diferentes tipos de procedimentos de paradas de forno são mostrados na Figura 3.3.

Figura 3-3 - Procedimentos de parada de um alto-forno



Fonte: Adaptado de Satyendra (2015)

3.2.1 Fanning

Em alguns casos não existe a possibilidade de se trabalhar com a produtividade total do alto-forno. O procedimento conhecido como *fanning* consiste em reduzir a pressão de sopro nos algaravizes de forma que o volume de ar injetado no alto-forno seja entre 20% e 25% do volume normal.

Desta forma, o alto-forno opera com produtividade e VDC (Velocidade de descida de carga) reduzidos. Este índice representa a velocidade com que a carga é fundida, possibilitando a entrada de novas cargas no forno.

Segundo Burgo (1999), a vantagem do *fanning* é que o sistema de gás do alto-forno se mantém pressurizado, possibilitando que o forno volte rapidamente a sua capacidade produtiva normal. Períodos prolongados de *fanning*, como 8 horas a cada 24 horas, podem ocasionar acúmulo de líquidos no cadinho do alto-forno e podem também favorecer a formação de crostas na parede do refratário, conhecidas pelo jargão popular “cascão”.

3.2.2 Back drafting

O processo conhecido como *back drafting* ou *back draught* é normalmente aplicado durante um período de até duas horas quando há a necessidade de realizar manutenções ou trocas na região dos algaravizes.

Segundo Goodman (1999), nesse processo, uma pressão negativa é aplicada na região da rampa do alto-forno, de forma que o monóxido de carbono e o hidrogênio presentes na região sejam sugados para um sistema de *back draft* localizado entre os regeneradores e a coroa do alto-forno. A principal maneira de controlar o volume de gás sugado é através de uma válvula borboleta, a partir de onde sai uma tubulação que conduz o gás a uma altura próxima a dos *bleeders*.

Durante o início do processo de *back drafting*, a temperatura no interior da coroa e na junção de *back draft* pode chegar a até 1650°C, enquanto o monóxido de carbono, saindo do alto-forno, entra em combustão em contato com ar que também entra no sistema. Assim, é necessário garantir que ar suficiente seja injetado no sistema afim de diluir os gases inflamáveis e reduzir a temperatura do sistema.

3.2.3 Banking

Quando há a necessidade de realizar uma parada de curta duração do sopro de um alto-forno, seja essa parada programada ou não, muitas vezes se utiliza o processo conhecido como *banking*, técnica também conhecida como “abafamento”.

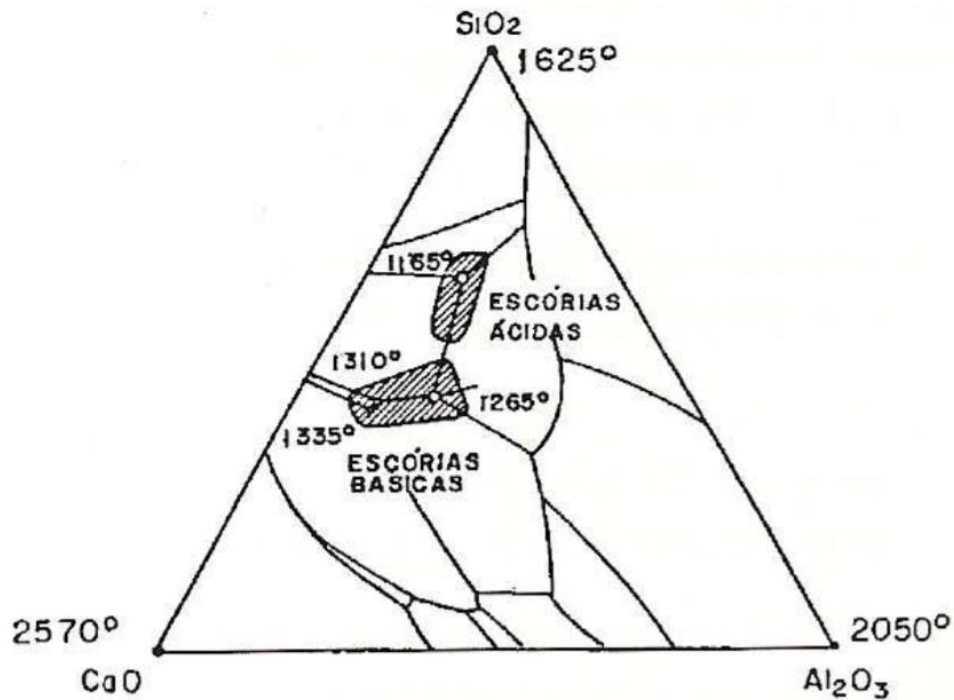
Nesse processo, o alto-forno deixa de ser carregado e o sopro de ar no mesmo é interrompido. Os algaravizes e ventaneiras são removidos e os orifícios dos mesmos são tapados com lama para impedir a entrada de ar e preservar o calor no interior do forno.

Nos casos onde o *banking* ocorre como um evento programado, medidas são tomadas para garantir que a retomada da produção normal do forno ocorra sem dificuldades. Primeiramente, reservas de coque ou carvão vegetal são adicionadas durante o carregamento do forno com o intuito de acelerar o aquecimento da carga após o *banking*. Segundo Vital e Pinto (2009), para a operação de um alto forno são consumidos em média 750kg de carvão vegetal para cada tonelada de ferro-gusa produzido. Esse valor pode variar conforme os parâmetros e condições do alto-forno, sendo necessário adicionar ou subtrair certa quantidade de carvão. O carvão ou coque adicionado além da quantidade calculada é chamado de reserva térmica positiva, enquanto o subtraído é chamado de reserva térmica negativa.

Alterações nos minérios presentes no leito também podem ser feitas com o intuito de garantir uma escória mais ácida, proporcionando uma menor temperatura *liquidus*. O nível da carga é observado diariamente de forma que a produção retorne quando as reservas térmicas chegarem na altura da rampa do forno.

Segundo Geerdes (2009), numa situação onde a escória final é muito básica ela pode deixar de ser líquida e assim não poderá ser vazada. Diagramas ternários permitem prever o estado físico da escória em dada temperatura identificar pontos de maior fluidez como mostrado na Figura 3.4:

Figura 3-4 - Sistema ternário cal-sílica -alumina



Fonte: Júnior (2007)

Segundo Burgo (1999), nos casos onde não há um tempo determinado para retomada das atividades do forno, acima das camadas já preparadas para o *banking* devem ser adicionadas grandes reservas térmicas. Diversas matérias-primas ricas em ferro são removidas e há uma grande redução na quantidade de calcário enornado. Se o *banking* durar mais que quatro ou cinco dias, dificuldades podem ocorrer para retomar a operação do alto-forno, porém, *bankings* de até sete dias já foram registrados sem que houvessem dificuldades de retomada das operações do forno.

3.2.4 Blowing out

Ao final da campanha de um alto-forno, muitas vezes, aplica-se o procedimento conhecido como *blowing out*. Esse procedimento também é utilizado em paradas de forno de longa duração, uma vez que recomeçar a operação do zero pode ser mais rápido que retomar as condições ideais do forno após um *banking*.

Segundo Burgo (1999), a preparação para o *blown out* começa entre doze e dezesseis horas antes do último vazamento do forno. A operação do forno é interrompida brevemente para a instalação de sprays de água no topo do forno, além da instalação de termopares nos *uptakes*.

A composição do leito do alto-forno também é alterada de forma que seja formada uma escória muito silicosa que ajudará a remover o máximo de cal possível da região da rampa e do cadinho. A cal, quando em contato com a água dos sprays, pode promover a formação do hidróxido de cálcio, que, por sua vez, pode danificar a região do cadinho.

A partir da etapa descrita acima há duas maneiras de realizar o *blown out*. O primeiro método consiste em carregar o forno com uma camada de coque, cujo volume seja similar ao da rampa do forno. Após a camada de coque será adicionado quartzito com granulometria entre 25mm e 50mm. A operação do forno é então retomada de forma que os sprays de água e a camada de sílica ajudarão a manter a temperatura de topo baixa enquanto a carga desce no interior do forno. O segundo método é similar ao primeiro, porém no lugar do quartzito adiciona-se uma camada de coque com granulometria entre 20mm e 25mm com a mesmo objetivo da sílica.

3.2.5 Blowing down

Este procedimento é utilizado principalmente ao final da campanha de um alto-forno. Segundo Burgo (1999), a partir de 1970, ficou aparente que os procedimentos de *blowing-out* e *banking* eram muito caros e comumente surgiam problemas para reativar o forno a partir de um *banking*. Além disso, já havia conhecimento técnico o suficiente para operar um forno até que o nível de carga chegasse na altura dos algaravizes sem realizar o carregamento do forno.

Assim, a operação conhecida como *blownig down* consiste em operar um forno sem realizar o carregamento do mesmo. O principal desafio desse procedimento é controlar a temperatura do topo. Conforme a carga desce, menor será a transferência de calor do gás para a carga e mais elevada será a temperatura no topo do alto-forno.

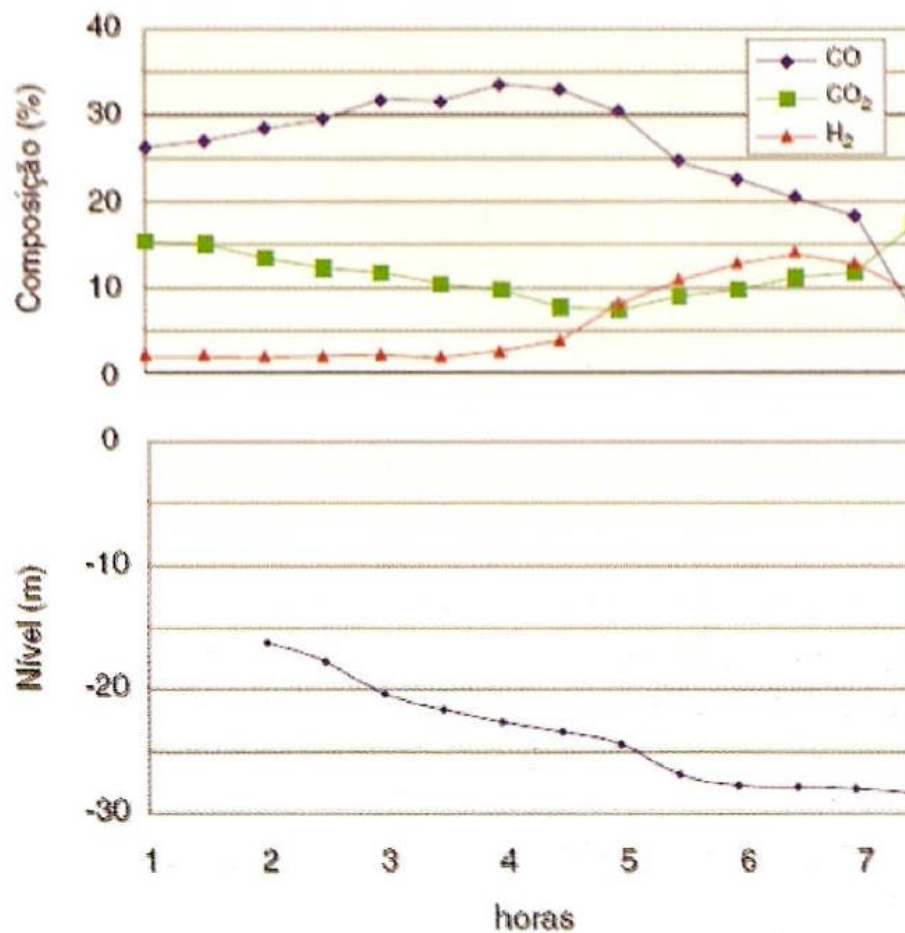
Para manter a temperatura do topo controlada, sprays de água aspergida são instalados no topo do forno. Sprays de vapor d'água e/ou nitrogênio também são instalados para ajudar a manter a temperatura, regular a pressão no interior do forno e ajudar a inertizar o gás presente.

A composição do gás que sai pelo topo deve ser constantemente analisada. Como foi mostrado por Liu (2020), o monitoramento da concentração de H_2 é necessário, pois, a água, quando em contato com a carga em altas temperaturas pode decompor em H_2 e O_2 para formar um gás de água explosivo. Além disso a composição do gás pode ser usada como indicativo para determinar o nível de carga.

Como indicado por Geerdes (2009), no início do processo, como menos oxigênio é removido do minério, a porcentagem de CO_2 diminui e a de CO aumenta. A concentração de H_2 tende a

aumentar devido ao contato da água com a carga. Ao final do processo o CO_2 não consegue se converter em CO e concentração de CO_2 aumenta e a de CO diminui, como mostrado na Figura 3.5.

Figura 3-5 - Variação da composição do gás do alto-forno durante um blown down.



Fonte: Geerdes (2007)

Após o *blown down* costuma-se realizar o procedimento conhecido como *salamander tap* ou em português “vazamento da salamandra”. Segundo Pontes (2018), esse procedimento consiste em drenar o ferro gusa da parte inferior do cadinho através da perfuração da carcaça e do refratário do mesmo, reduzindo assim o tempo de limpeza do cadinho após um blow down.

4 METODOLOGIA

Inicialmente, cabe informar que manteve-se o anonimato da empresa objeto desta pesquisa, não somente por questões éticas mas também para proteger o nome desta contra eventual exposição. Aqui, cabe dizer que, em que pese ocultado o nome da empresa, os fatos e fenômenos aqui narrados são fidedignos ao acontecido.

Há que se ressaltar que o nome da siderúrgica não tem importância para o experimento, haja vista que os dados foram aferidos e o que importa são as variáveis que põem em jogo as relações de causa e efeito. Neste sentido, o nome da empresa não é dado imprescindível e tampouco relevante.

4.1 Estrutura da Siderúrgica

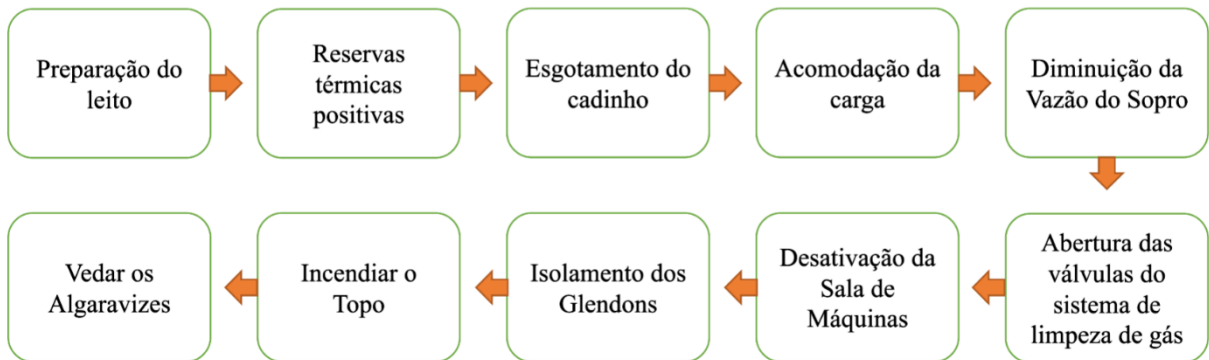
A siderúrgica analisada conta com um alto-forno a carvão vegetal com capacidade volumétrica de 145m³ e capacidade produtiva de 10.500 toneladas/mês de ferro-gusa, possuindo também 3 regeneradores do tipo glendon e um sistema de limpeza de gás constituído por um coletor de pó, um lavador de gás e um desumidificador.

Operando apenas na etapa de redução do minério, classifica-se a empresa como uma usina siderúrgica não integrada de pequeno porte.

4.2 Paradas Programadas

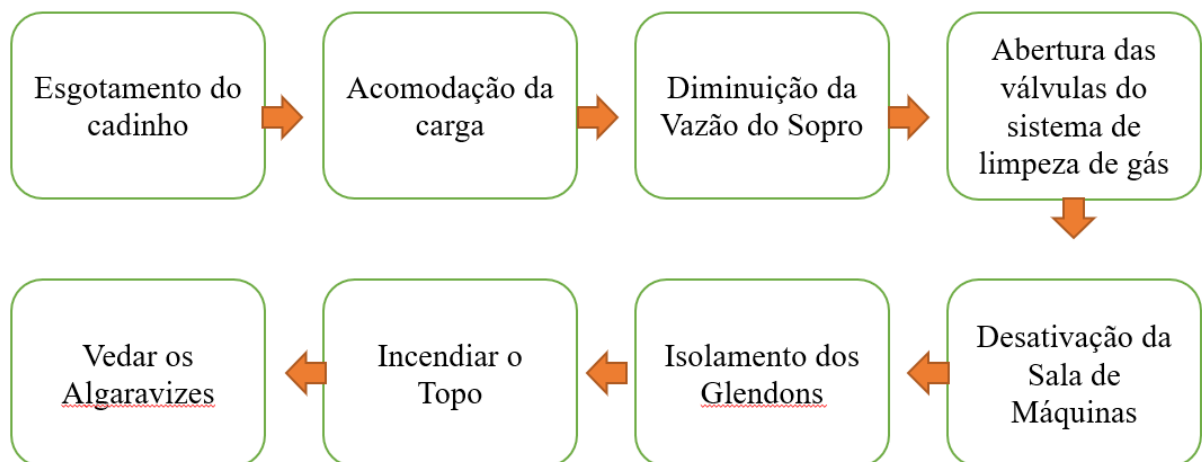
A metodologia aqui descrita foi obtida no decorrer de 21 dias, período no qual houveram duas paradas programadas de forno e uma parada não-programada. As paradas programadas serão aqui identificadas por “P1” e “P2”, enquanto a parada não-programada será identificada como “P3”.

As paradas programadas P1 e P2 foram realizadas para manutenções preventivas, sendo efetuadas conforme descrito nesse tópico. A sequência de etapas utilizadas para realizar essas paradas programadas pode ser observada na Figura 4.1.

Figura 4-1- Sequência de etapas das paradas programadas

Fonte: Autoria Própria

Durante a parada não programada, P3, não houve adição de reservas térmicas positivas para compensar o tempo que o forno ficou inativo, sendo as reservas térmicas presentes na coluna adicionadas para compensar condições adversas que o forno vinha apresentando, tais como temperatura do ferro gusa abaixo da faixa visada e cargas sem toque de sonda. Também não foi possível realizar o abastecimento do forno simultaneamente ao esgotamento do cadinho durante a parada. Nos demais aspectos, a parada não programada, P3, foi realizada conforme as paradas P1 e P2. A sequência de etapas utilizada para efetuar a parada não programada pode ser observada na Figura 4.2.

Figura 4-2 Sequência de etapas da parada não programada

Fonte: Autoria Própria

4.2.1 Preparação do leito

A preparação do leito do alto-forno para uma parada programada, na siderúrgica analisada, se iniciou, em ambos os casos, com a remoção de componentes que poderiam dificultar a retomada das condições ideais do forno após a parada, tais como sucatas de ferro e aço.

A coluna de carga, assim chamado o conjunto de camadas intercaladas de carvão e minério presentes no interior do alto-forno, foi preparada de forma que as cargas contendo sucatas fossem esgotadas antes de dar continuidade aos procedimentos de parada do forno. Para tal, foi estipulado que a coluna de carga do alto-forno analisado fosse composta pelas 45 últimas cargas introduzidas.

4.2.2 Reservas térmicas positivas

O percentual de reservas térmicas positivas adicionadas foi determinado analisando os seguintes parâmetros: tempo estimado de parada (entre 1h e 12h), temperatura do ferro gusa (faixa de trabalho ente 1370°C e 1400°C), VDC (idealmente 10carga/h), número de cargas sem toque de sonda (cargas carregadas no alto-forno de forno cujo nível está abaixo do limite de medição da sonda eletromecânica, idealmente 0), além da densidade, umidade e granulometria do carvão (os parâmetros visados para o carvão vegetal estão indicados na Tabela 4.1).

Tabela 4-1 -Parâmetros visados para o carvão vegetal

Densidade	Umidade	Granulometria
> 220 kg/m ³ e < 260 kg/m ³	< 6 %	Cilindro com aproximadamente 8 cm de diâmetro e 15 cm de altura.

Fonte: Autoria Própria

Para temperaturas do ferro gusa abaixo da faixa de trabalho foram adicionadas reservas térmicas positivas.

Reservas térmicas positivas também foram adicionadas ‘para valores de VDC acima do ideal, uma vez que valores acima do padrão indicam uma rápida descida da carga e um menor tempo

de residência da mesma no interior do forno. Dessa forma, é esperado as cargas não fiquem tempo o suficiente nas zonas adequadas do alto-forno para realizar a redução do minério.

Reservas térmicas positivas foram adicionadas para parâmetros de densidade e umidade do carvão fora das respectivas faixas visadas, assim como para carvões com granulometrias muito abaixo da especificada.

4.2.3 Esgotamento do cadinho

O esgotamento do cadinho foi determinado comparando a produção real e a teórica de gusa, sendo a produção teórica calculada em função do enforamento de minério e do teor de ferro presente no mesmo, e a produção real determinada através do peso do gusa produzido aferido em balança. Valores próximos de produção real e teórica indicavam o esgotamento do cadinho do alto-forno, enquanto valores teóricos superiores aos reais indicavam um não esgotamento do mesmo.

Outro indicativo utilizado para determinar o esgotamento do cadinho foi a intensidade do sopro através do furo de corrida do forno. Um sopro intenso indicava esgotamento do cadinho enquanto um sopro brando indicava a presença de gusa no mesmo. Imagens comparativas entre sopro brando e intenso podem ser observadas na figura 4.3.

Figura 4-3 - Diferentes intensidades de sopro de um alto-forno



Fonte: Autoria Própria

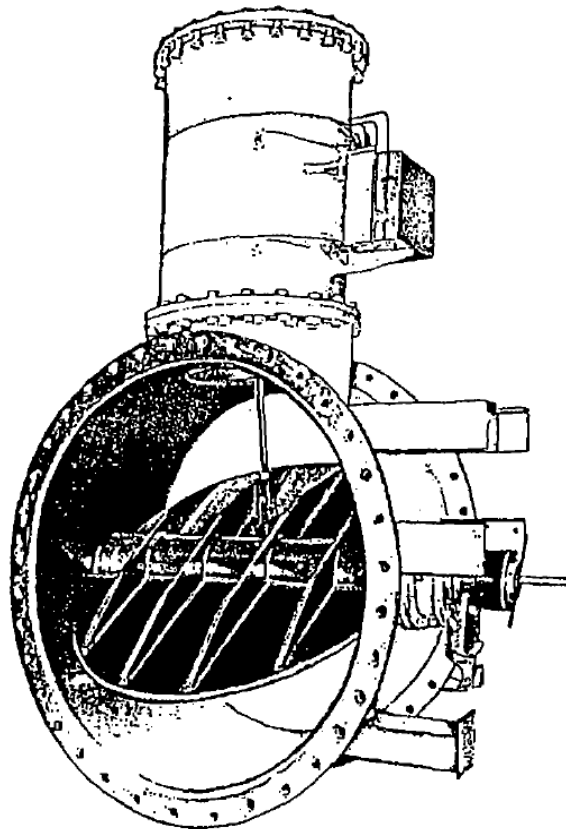
4.2.4 Acomodação da carga e diminuição da vazão do ar de sopro

Nessa etapa, o volume de ar injetado pelos algaravizes foi diminuído gradativamente, de forma que a carga consiga descer e se acomodar. Um corte súbito do ar injetado pode gerar um efeito

similar ao de um grande arriamento de carga, permitindo assim retorno de material através dos algaravizes.

O controle da pressão do ar injetado através dos algaravizes foi realizado utilizando um painel de controle por meio do qual era possível controlar a abertura da válvula que permitia a entrada de ar para os turbo-sopradores. Uma representação da válvula anteriormente citada pode ser observada na Figura 4.4.

Figura 4-4 – Representação da válvula de controle da pressão de trabalho do alto-forno.



Fonte: Goodman (1999)

A pressão foi reduzida gradativamente de 6,5 M.C.A. (Metros de Coluna d'água) para 3,0 M.C.A. A pressão foi mantida em 3,0 M.C.A. por alguns minutos para que fosse possível realizar a acomodação da carga no forno e verificar se houve retorno de material através dos algaravizes.

A pressão foi reduzida de 3 M.C.A. para 0 M.C.A, indicando que a válvula de entrada de ar para os turbo-sopradores estava completamente fechada.

Conforme era realizado o fechamento da válvula de entrada de ar para os turbo-sopradores a vazão do ar de sopro foi reduzida. A vazão do ar de sopro foi gradativamente reduzida de aproximadamente 22000 Nm³/h até zerrar.

4.2.5 Abertura das válvulas do sistema de limpeza de gás

Nesta etapa foram abertas as válvulas localizadas no topo do sistema de limpeza de gás com o intuito de evitar o acúmulo de GAF no mesmo e permitir a projeção de chamas durante a operação de incendiar o topo, evitando assim grandes danos.

A abertura das válvulas do sistema de limpeza de gás foi realizada manualmente através de um sistema de alavancas. As alavancas foram sempre abertas no sentido do coletor de pó, para o lavador de gás e por último o desumidificador.

4.2.6 Desativação da Sala de Máquinas

Abertas as válvulas do sistema de limpeza de gás, o eletricista foi contactado para desligar os turbo-sopradores. Após desligados os turbo-sopradores, foi fechado o registro que permitia a passagem de ar através da saída do último turbo-soprador em linha para os glendons. Dessa forma, o sistema permanecia isolado enquanto que os registros de entrada e saída de ar do turbo-sopradores ficavam fechados. Cinco minutos após o isolamento do sistema dos turbo-sopradores, a válvula do topo do alto forno foi aberta.

4.2.7 Isolamento dos Glendons

Após isolado o sistema dos turbo-sopradores fecharam-se os registros de entrada de ar de sopro e de entrada de gás dos glendons. A chaminé dos mesmos também foi fechada para evitar perdas térmicas através da mesma.

Pedaços de “tiço” (lenha mal carbonizada, não sendo considerada nem lenha nem carvão) foram introduzidos nos glendons para manter o interior dos mesmos em chamas. Desta forma, após as paradas, foi possível rapidamente realizar a combustão do gás combustível ao abrir a entrada de gás combustível.

4.2.8 Incendiando o Topo

Segundo Liu (2020), o processo conhecido como “incendiar o topo” consiste em realizar a combustão do GAF residual a fim de evitar intoxicação pelo monóxido de carbono e evitar o

risco de explosões inesperadas durante a parada de forno. Para tal, o alto-forno deve estar devidamente carregado, assim evitando acúmulo excessivo de GAF na região superior do forno.

Para incendiar o topo, uma escotilha no topo do forno foi aberta e com auxílio de um carboxímetro a verificação dos níveis de CO foi realizada. Utilizando máscaras de oxigênio uma tocha feita com pano embebido em óleo diesel foi introduzida através da escotilha.

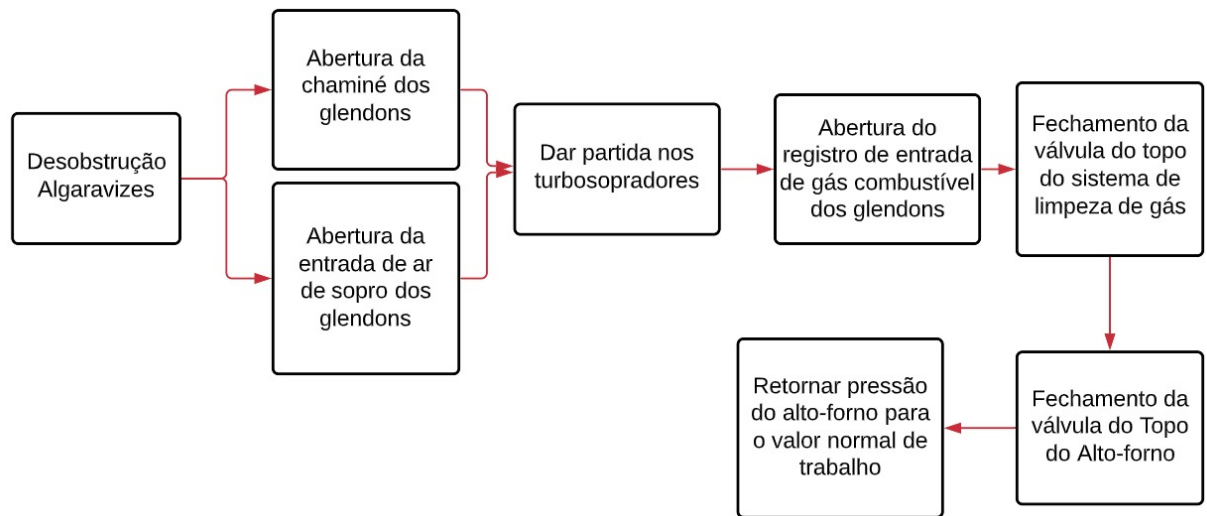
Após incendiado o topo, os algaravizes foram abertos, limpos e vedados com lama a fim de evitar o retorno de material e principalmente evitar perdas térmicas através do orifício.

4.3 Reativação do Alto-Forno

Tão importante quanto os processos para parar um alto-forno são os processos para retomar suas atividades. Desta forma, as etapas para retomada das atividades do alto-forno foram as seguintes:

- Desobstruir os algaravizes que haviam sido vedados anteriormente, permitindo assim a entrada de ar através dos mesmos;
- abrir tanto a chaminé quanto a válvula de entrada de ar de sopro dos glendons, sendo que a entrada do gás combustível deve ser mantida fechada;
- com a entrada de ar dos glendons aberta foi possível dar partida no turbo-sopradores;
- a pressão foi mantida baixa até que fosse possível observar gás sendo purgado através do topo do forno, sistema de lavagem de gás e tocha dos glendons;
- o registro de entrada de gás combustível dos glendons foi então aberto, sendo as válvulas do topo e do sistema de lavagem de gás fechadas uma por vez até que houvesse gás o suficiente no interior dos glendons para que ocorresse a combustão do mesmo;
- com os glendons já acesos, foi possível retornar lentamente a pressão do alto-forno para o valor normal de trabalho.

A Figura 4.5 demonstra as etapas utilizadas para efetuar a reativação do alto forno após as paradas.

Figura 4-5 - Etapas para reativação do alto-forno

Fonte: Autoria Própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A duração das paradas de forno P1, P2 e P3 e o percentual de reservas térmicas distribuídas ao longo da coluna de carga podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5-1 – Duração das paradas e percentual de reservas térmicas positivas

	P1	P2	P3
Duração	6h e 49min	3h e 8min	1h e 35min
Reservas térmicas positivas	10,5%	7,3%	5,8%

Fonte: Autoria própria

Observa-se que as reservas térmicas positivas presentes durante a P3 não levam em consideração o tempo previsto de parada de forno, sendo adicionadas previamente para contornar situações adversas que o forno já vinha apresentando.

Durante o processo de redução da pressão e vazão do ar de sopro não houve retorno de gusa através dos algaravizes em nenhuma das paradas, incluindo a P3, havendo somente o retorno de uma pequena quantidade de escória através de alguns dos mesmos. Acredita-se que esse retorno não ocorreu, pois o cadinho foi vazado previamente à parada e além disso a carga foi acomodada anteriormente ao desligamento dos turbo-sopradores.

O material retornado através dos algaravizes foi facilmente removido, uma vez que não houve retorno de gusa através dos mesmos. O orifício dos mesmos foi vedado com lama, sendo a impossibilidade de visualizar o material incandescente no interior do mesmo indicativo de uma vedação eficiente. A Figura 5.1 demonstra o resultado da vedação de um dos algaravizes.

Figura 5-1 - Algaravizes antes e após vedação



Fonte: Autoria própria

Logo após a reativação do forno, durante as paradas P1 e P2, houve toque da sonda na carga, indicando que o forno estava cheio, enquanto durante a P3 somente houve toque de sonda após o abastecimento de 10 cargas no forno, indicando que o forno não estava cheio.

Durante a operação de incendiar o topo, houve pequena projeção de chamas durante as paradas P1 e P2, enquanto durante a parada P3 houve forte projeção de chamas.

Segundo Geerdes (2007, p. 111), quando há o abaixamento de carga sem o seu carregamento simultâneo: “[...] tendo em vista que cada vez menos oxigênio é removido do minério, o percentual de CO₂ decresce e o percentual de CO aumenta.”

A forte projeção ocorreu provavelmente devido ao aumento dos níveis de CO na parte superior do alto-forno, uma vez que não foi possível realizar o abastecimento correto do forno durante a P3.

As temperaturas do ferro gusa registradas anteriormente à parada e nas 6 horas seguintes ao esgotamento do forno podem ser observadas na Tabela 5.2. Valores representados por “-” indicam que correu somente escória durante o período.

Tabela 5-2 - Variações de temperatura anteriormente e após as paradas de forno

Período em relação às paradas	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)
Anterior	1354	1370	1358
1 hora após	-	1420	1300
2 horas após	-	1430	1301
3 horas após	1380	1412	1301
4 horas após	1390	1426	1320
5 horas após	1395	1400	1360
6 horas após	1404	1392	1287

Fonte: Autoria própria

Observa-se que a temperatura do ferro gusa anterior as paradas P1 e P3 se encontrava inferior a faixa de trabalho (1370°C a 1400°C). Comparando as tabelas 5.1 e 5.2 podemos observar que após a reativação do alto-forno, nas paradas programadas, P1 e P2, o mesmo operou com temperatura do ferro gusa próxima à faixa de trabalho, enquanto, na parada não programada P3 operou muito abaixo da mesma. A adição de reservas térmicas positivas para compensar o tempo no qual o alto-forno foi parado é, provavelmente, a principal causa de tal efeito.

As velocidades de descida de carga obtidas nas 6 horas que sucederam as paradas de forno podem ser observadas na Tabela 5.3.

Tabela 5-3 - Velocidade de descida de carga após paradas de forno

Período em relação as paradas	P1 (cargas)	P2 (cargas)	P3 (cargas)
1 hora após	1	7	3
2 horas após	10	9	7
3 horas após	8	10	6
4 horas após	8	8	8
5 horas após	10	8	9
6 horas após	10	10	9
Média	7,83	8,67	7,00

Fonte: Autoria própria

Observe que na primeira hora após as paradas, em especial nas paradas P1 e P3, a VDC foi inferior a visada (10 cargas/hora).

De acordo com os estudos de Geerdes (2007, p. 109):

“[...] A temperatura decrescente causa resolidificação dos materiais sob fusão. Desta forma, após uma parada, leva um tempo para a carga começar a descer. A descida da carga começa novamente assim que a zona de fusão “antiga” é fundida [...]”

Levando em consideração a temperatura do ferro gusa como indicativo da temperatura interna do alto-forno e, analisando as Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, podemos pressupor que a baixa temperatura com que o alto-forno foi parado nas paradas P1 e P3 exigiu um maior tempo para a carga voltar a fundir após as paradas, resultando em uma baixa VDC na primeira hora após as mesmas.

A recuperação mais rápida para o valor de trabalho da VDC da P1 em relação a P3 se deve, provavelmente, ao maior percentual de reservas térmicas positivas adicionado.

Durante as 6 seguintes horas que sucederam as paradas P1 e P2, foram registrados valores para vazão do ar de sopro forno variando entre 21000 Nm³/h e 24000 Nm³/h, enquanto durante a P3 a vazão variou entre 14000 Nm³/h e 21000 Nm³/h. Os valores obtidos referentes as vazões do ar de sopro após as paradas podem ser observados na Tabela 5.4.

Tabela 5-4 - Valores registrados para vazão do ar de sopro

Período em relação as paradas	P1 (Nm³/h)	P2 (Nm³/h)	P3 (Nm³/h)
1 hora após	22000	22000	14000
2 horas após	22000	22000	18000
3 horas após	24000	22000	15000
4 horas após	23000	22000	20000
5 horas após	23500	22000	20000
6 horas após	24000	21900	21000

Fonte: Autoria própria

Observa-se que a vazão de ar de sopro durante as primeiras horas foi muito inferior na parada P3 quando comparado com as demais.

Segundo Burgo (1999, p. 705, tradução nossa): “[...]Sucatas de baixa granulometria que não são adequadas para uso em aciaria podem ser utilizadas em altos-fornos, porém, a quantidade deve ser limitada devido ao seu efeito adverso na permeabilidade do alto-forno[...].”

Dessa forma é possível supor que a sucata presente nesta parada influenciou diretamente na permeabilidade inicial do leito do alto-forno, proporcionando assim, uma menor vazão do ar de sopro.

6 CONCLUSÕES

O vazamento do cadinho anteriormente as paradas mostrou-se eficaz no que diz respeito ao retorno de material através dos algaravizes.

A preparação do leito e adição de reservas térmicas positivas influenciam nos parâmetros do alto-forno após uma parada de forno.

A remoção de sucatas de aço de baixa granulometria durante a etapa de preparação do leito influencia na permeabilidade do leito do alto-forno após a reativação do mesmo.

A temperatura com que o alto-forno é parado influencia na velocidade de descida de carga após a reativação do mesmo.

A adição de reservas térmicas positivas visando compensar o tempo no qual o forno será parado influencia na temperatura do ferro gusa após a parada.

O nível de carga é fator fundamental durante a operação de incendiar o topo, sendo que um nível de carga mais elevado proporcionou uma menor projeção de chamas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSUNÇÃO, Charles. **Glendon siderúrgico: análise termodinâmica e modelagem matemática simplificada**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2006.

BURGO, J. A. The Manufacture of Pig Iron in the Blast Furnace. *In*: WAKELIN, D. H. (ed.). **The Making, Shaping and Treating of Steel**. 11. ed. Pittsburgh: [s. n.], 1999. v. Ironmaking, cap. 10, p. 699-739.

CARVALHO, P. S. L. et al. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. BNDES Setorial, n. 41, Rio de Janeiro, p. 181-236, mar. 2015.

GEERDES, Maarten *et al.* Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction. 2. ed. Amsterdam: 2009.

GEERDES, Maarten *et al.* **Práticas modernas para operação de alto-fornos**. [S. l.: s. n.], 2007.

GOODMAN, Neil. Blast Furnace Design II. *In*: FISCHER, A. J. (coord.). **An Intensive Course: Blast Furnace Ironmaking**. Hamiltom, Ontario, Canada: [s. n.], 1999. v. 1, cap. 6

JÚNIOR, Dilermando Salvador. Reações de formação da escória. *In*: JÚNIOR, Dilermando Salvador. **Estudo Do Comportamento De Escórias De Alto-Forno A Carvão Vegetal Produzidas A Partir De Ativação À Quente**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2007

LIU, Yuncai. **The Operation of Contemporary Blast Furnaces**. Tradução: Jianliang Zhang, Kexin Jiao, Wudi Huang. [S. l.]: Springer, 2020. 455 p. ISBN 978-981-15-7074-2. *E-book* (477 p.).

MOURÃO, Marcelo Breda *et al.* Introdução à Siderurgia. São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

PONTES, Filipe Soares *et al.* Blow down e drenagem da salamandra do alto-forno N°2*. *In*: ABM WEEK, 4ª edição., 2018, São Paulo. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2018. Tema: Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e Aglomeração de Minério de Ferro, DOI 10.5151/2594-357X-32127. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/blow-down-e-drenagem-da-salamandra-do-alto-forno-n2>. Acesso em: 20 out. 2021.

SATYENDRA. 2013. Disponível em: <<https://www.ispatguru.com/methods-of-shutting-down-a-blast-furnace/>> Acesso em 10/10/2021.

SINDIFER- SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Anuário estatístico 2020**: Produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil. Minas Gerais, 2020.

VITAL, Marcos Henrique Figueiredo; PINTO, Marco Aurélio Cabral. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. **BNDES SETORIAL**, Rio de Janeiro, ed. 30, 19 fev. 2014. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1310>. Acesso em: 10 nov. 2021.