

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS

Dissertação de Mestrado

“Balanço de massa integrado do ferro-gusa entre altos-fornos e Aciaria da Aperam
South America”.

Autor: Péricles Guimarães Oliveira Aguiar
Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro

Maio/2016

Péricles Guimarães Oliveira Aguiar

“Balanço de massa integrado entre altos-fornos e Aciaria da Aperam South America”.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da Universidade Federal de
Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de
Castro

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2016

A282b	<p>Aguiar, Péricles Guimarães Oliveira. Balanço de massa integrado do ferro-gusa entre altos-fornos e aciaria da Aperam South America [manuscrito] / Péricles Guimarães Oliveira Aguiar. – 2016. xiv, 78 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Luiz Fernando Andrade de Castro.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia metalúrgica – Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Altos-fornos -Teses. 4. Ferro gusa - Teses. I. Castro, Luiz Fernando Andrade de. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 669(043)

Dedico este trabalho a minha família.

Agradecimentos

O autor agradece a todas as pessoas que colaboram, direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho, e em particular:

A empresa Aperam South America, pela oportunidade de crescimento profissional.

Aos engenheiros Edalmo Magalhães, Robson Machado e Guilherme do Espírito Santo pelo apoio e pela oportunidade de dedicação ao mestrado.

A todas as equipes das gerências dos Altos-Fornos e Aciaria.

Aos companheiros do controle de processo da redução (PREC), representados pelo engenheiro Luiz José Gonçalves, pelo apoio durante a elaboração do trabalho.

Aos companheiros do controle de processo da Aciaria (PACC), em especial ao Edilson Cavaliere pela dedicação no levantamento dos dados da Aciaria.

Ao professor e orientador Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro, pela sua disponibilidade a mim dedicada, pelas sugestões e críticas neste trabalho.

Ao Dr. Marcio Ferreira Rodrigues pelos conselhos.

Aos companheiros de jornada, os engenheiros Marcio Nascimento Cunha e Janeir Ribeiro Dutra, pela amizade e incentivo no período de conclusão dos créditos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO	xi
1 – INTRODUÇÃO	11
2 – OBJETIVO	14
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 – Aperam South America	15
3.2 – Produção do ferro-gusa	18
3.2.1 – Princípio de funcionamento do alto-forno.....	18
3.2.2 – Produtividade do Alto-Forno.....	22
3.2.3 – Composição do ferro-gusa e formação da escória.....	23
3.3 – Refino do ferro-gusa	25
3.3.1 – Dessiliciação.....	27
3.3.2 – Desfosforação	27
3.3.3 – Dessulfuração	28
3.3.4 – Refino do ferro-gusa no convertedor MRP-L	29
3.3.5 – Refino do ferro-gusa no convertedor AOD-L	31
3.5 - Definição de balanço de massa.....	33
4 – METODOLOGIA.....	36
4.1 – Equipamentos	36
4.2 – Rota do ferro-gusa	37
4.3 – Base de dados	39
4.4 – Análise química do ferro-gusa e escória.....	43
4.5 – Coleta e análise dos dados	43
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 – Desenvolvimento do balanço de massa do alto-forno	44
5.2 – Desenvolvimento do balanço de massa das etapas de refino	46

5.3 – Resultados do balanço de massa dos altos-fornos.....	50
5.3.1 – Qualidade dos materiais carregados no alto-forno	50
5.3.2 – Relação da produção calculada pelo balanço de massa e os dados industriais	52
5.4 – Resultados do balanço de massa das etapas de refino	56
5.4.1 – Premissa para elaboração do balanço de massa	56
5.4.2 – Balanço de massa da Dessiliciação (Rota 1)	56
5.4.3 – Influência do teor de silício dissolvido no ferro-gusa no processo desfosforação.....	59
5.4.4 – Balanço de massa da Desfosforação (Rota 2)	62
5.5 – Integração dos balanças de massa do ferro-gusa	64
5.5.1 – Validação do balanças de massa integrado do ferro-gusa	66
6 – CONCLUSÃO	69
7 – SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1- Produção de aço bruto por processo de fabricação. (IABr – Instituto Aço Brasil)	11
Figura 1. 2 - Participação do ferro-gusa na composição do custo final do aço.	12
Figura 1. 3 - Rendimento do ferro-gusa entre os anos de 2008 a 2015. (Aperam South America, 2015).....	13
Figura 3. 1 - Fluxo de Produtivo da Aperam South America. (Aperam South America, 2014).....	16
Figura 3. 2 - Esquema da região interna do alto-forno. (CASTRO, 1997)	19
Figura 3. 3 - Equilíbrio entre CO e o CO ₂ . (GEERDES et al., 2009).....	20
Figura 3. 4 - Apresentação esquemática da relação entre os óxidos de ferro, composição do gás e temperatura. (GEERDES <i>et al.</i> , 2009).....	21
Figura 3. 5 - Composição química típica do ferro-gusa e da escória. (GEERDES <i>et al.</i> , 2009).....	23
Figura 3. 6 - Evolução dos processos de refino no decorrer dos anos. (KOROS, 1998) 25	
Figura 3. 7 - Evolução do fósforo, silício e carbono em função do consumo de oxigênio. (KOROS, 1998)	26
Figura 3. 8 - Desenho ilustrativo do convertedor BOF (MRP-L). (BARÃO, 2007)	30
Figura 3. 9- Oxidação dos elementos durante o sopro de oxigênio. (DEO & BOOM, 1993).....	31
Figura 3. 10 - Desenho esquemático do AOD-L. (MARIN, 2006)	32
Figura 4. 1- Fluxo do ferro-gusa na ROTA 1.	37
Figura 4. 2 - Fluxo do ferro-gusa na ROTA 2.	38
Figura 5. 1 - Balanço de massa do ferro e da sílica de forma esquemática.	44
Figura 5. 2 - Balanço de massa do ferro de forma esquemática.	47
Figura 5. 3 - Gráfico as produções do alto-forno 1.	53
Figura 5. 4 - Gráfico as produções do alto-forno 2.	53
Figura 5. 5 - Gráfico das perdas de massa do ferro-gusa.	55
Figura 5. 6 - Tela de controle operacional da etapa de dessiliciação.	57
Figura 5. 7 - Gráfico de correlação do rendimento real e o teor de silício dissolvido no ferro-gusa.	59

Figura 5. 8 - Comportamento do carbono, silício, manganês e fósforo durante a etapa de desfosforação.	60
Figura 5. 9 - Correlação entre o teor de silício do ferro-gusa e o teor de silício após a etapa de (DeSi – 1).	61
Figura 5. 10 - Desenho esquemático de uma estação de desfosforação. (KOROS, 1998)	62
Figura 5. 11 - Tela de entrada dos dados do balanço integrado.	64
Figura 5. 12 - Tela de saída dos dados do balanço integrado.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela III. 1– Característica físico-química dos tipos de refino do ferro-gusa.	26
Tabela IV. 1 - Aspectos técnicos dos Altos-Fornos.....	36
Tabela IV. 2 - Aspectos técnicos da Estação de Pré-Tratamento do Gusa (PTG).....	36
Tabela IV. 3 - Variáveis do alto-forno 1.	40
Tabela IV. 4 - Variáveis do alto-forno 2.	41
Tabela IV. 5 - Variáveis para o cálculo do balaço de massa da rota 1.....	42
Tabela IV. 6 - Variáveis para o cálculo do balaço de massa da rota 2.....	42
Tabela V. 1– Composição química média da carga metálica.	50
Tabela V. 2– Desvio padrão da composição química da carga metálica.	50
Tabela V. 3– Composição química média dos fundentes e das cinzas dos redutores.....	51
Tabela V. 4– Desvio padrão da composição química dos fundentes e das cinzas dos redutores.	51
Tabela V. 5 - Dados do SIP e o resultado do balanço de massa.	52
Tabela V. 6 – Rendimento do ferro-gusa com base na produção calculada pelo balanço de massa e pelo SIP.	54
Tabela V. 7 – Dados do rendimento do ferro-gusa da rota 1.....	58
Tabela V. 8 - Impacto do %Si no consumo de agente DeP e no tempo de refino do ferro- gusa.....	61
Tabela V. 9 - Dados reais e teóricos de entrada e saída do balanço de massa da rota 2.	63
Tabela V. 10 - Limites técnicos para produção diária por tipo de aço.....	65
Tabela V. 11 - Dados de entrada do balanço integrado.....	66
Tabela V. 12 - Simulação do <i>SPEED</i>	67
Tabela V. 13 - Resultados da massa de ferro-gusa solidificado.	67

LISTA DE NOTAÇÕES

IABr – Instituto do Aço Brasil

MRP-L – Metal Refining Process with Lance

GO – Grão Orientado

GNO – Grão Não Orientado

BOF – Basic Oxygen Furnance

PTG – Pré-Tratamento do Gusa

FEA – Forno Elétrico a Arco

AOD-L – Argon Oxigen Descarburation with Lance

VOD – Vacumm Oxigen Descarburation

LTQ – Laminação de Tiras a Quente

LTF – Laminação de Tiras a Frio

R_{Gusa} – R endimento do ferro gusa;

$Gusa_{aciaria}$ – Ferro-gusa recebido na aciaria;

$Gusa_{calculado}$ – Produção calcula do ferro-gusa.

$P(t/h)$ - Produção de gusa do alto-forno;

$Q(kcal/h)$ - Quantidade de calor gerada nas ventaneiras;

$q(kcal/t)$ - Quantidade de calor necessária para produzir uma tonelada de gusa.

$C(kg/h)$ - Quantidade de queimada por hora

$c(kg/t)$ - Quantidade de carbono necessária para produzir uma tonelada de gusa

RESUMO

Motivado pelo baixo rendimento do ferro-gusa em 2015, para o presente trabalho foi desenvolvido um balanço de massa que entregue a produção dos altos-fornos e as etapas de refino do ferro-gusa na Aciaria com o objetivo de identificar as principais variáveis que afetam o rendimento.

O balanço de massa desenvolvido para os altos-fornos apresentou resultados satisfatórios quando comparados aos valores industriais. As variações apresentadas estão relacionadas à composição química dos materiais carregados. Onde a produção calculada pelo SIP (Sistema de Informações de Processo) utiliza as médias diárias das composições químicas dos materiais e o cálculo do balanço de massa utiliza a média anual.

O balanço de massa do ferro-gusa entregue para Aciaria apresentou a geração de ferro-gusa sólido como a variável que mais impacta no rendimento do ferro-gusa. Sendo 79,2% da perda de massa de ferro-gusa.

O balanço de massa desenvolvido para as etapas de refino apresentou resultados satisfatórios quando comparados aos valores industriais. As variações apresentadas estão relacionadas à perda de massa durante a raspagem de escória e as perdas por projeções (perda de massa de ferro-gusa e escória durante a dessiliciação).

O rendimento global do ferro-gusa após a dessiliciação mostrou ser dependente do percentual de silício dissolvido no ferro-gusa, com um coeficiente de correlação de $R=0,74$ ($R^2=0,54$).

Os efeitos do percentual do silício dissolvido no ferro-gusa são observados na etapa de desfosforação, onde o tempo de tratamento e o consumo do agente desfosforante são dependentes desse elemento.

O balanço de massa integrado permitiu calcular a massa de ferro-gusa solidificado em função da produção dos Altos-Fornos, da qualidade do ferro-gusa (percentual de silício), da rota de refino e do tipo de aço produzido na Aciaria.

Conhecer previamente o valor da massa de ferro-gusa solidificado é fundamental para o planejamento da produção dos altos-fornos e dos aços na Aciaria. Alterações estratégicas no planejamento podem evitar ou reduzir a geração de ferro-gusa sólido, permitindo seu maior aproveitamento na Aciaria, conseqüentemente melhorando o rendimento.

ABSTRACT

Motivated by the low yield of pig iron in 2015 for this work was a mass balance that delivers the production of blast furnaces and refining stages of pig iron in Steelmaking in order to identify the main variables that affect the yield.

The mass balance designed for blast furnaces showed satisfactory results when compared to industrial values. The presented variations are related to the chemical composition of the charged materials. Where production calculated by the SIP (System Process Information) uses the daily average chemical composition of materials and the mass balance calculation uses the annual average.

The mass balance of pig iron delivered to Steelmaking presented the generation of solid pig iron as the variable that most impacts the performance of pig iron. It is 79.2% of the mass loss of pig iron.

The mass balance developed for the refining steps presented satisfactory results when compared industrial values. The presented variations are related to the weight loss during the slag scraping and losses projections (mass loss of hot metal and slag during desiliconization).

The overall yield of hot metal after desiliconization had to be dependent on silicon percentage dissolved in the pig iron, with a correlation coefficient $R = 0.74$ ($R^2 = 0.54$).

The effects of silicon percentage dissolved in the hot metal are observed in the dephosphorization stage, where the treatment time and consumption of dephosphorization agent are dependent on this element.

The integrated mass balance allowed us to calculate the pig iron mass solidified due to the production of Blast Furnace, the quality of pig iron (silicon percentage), refining route and reduced steel type in Steelmaking.

Previously know the value of the solidified pig iron mass is essential for planning the production of blast furnaces and steel in Steelmaking. Strategic changes in planning can prevent or reduce the generation of solid pig iron, allowing it to better use in Steelmaking thus improving performance.

1 – INTRODUÇÃO

Principal matéria-prima para produção de aço nas usinas integradas, o ferro-gusa é o resultado da redução do minério de ferro no alto-forno. De acordo com os dados do Instituto Aço Brasil (IABr) a produção de aço bruto via usinas integradas teve um aumento de 1,9% no ano 2015 quando comparado ao ano de 2014. Enquanto que a produção de aço bruto via usinas semi-integradas (Aciaria elétrica) recuou 14,7% para o mesmo período, resultado da crise no setor de energia elétrica. A figura 1.1 apresenta os dados da produção de aço bruto por processo.

PRODUTOS	JAN/DEZ		15/14 (%)	OUT 2015	NOV 2015	DEZEMBRO		15/14 (%)	ÚLTIMOS 12 MESES
	2015(*)	2014				2015(*)	2014		
	Unid.: 10 ³ t								
- ACIARIA									
OXIGÊNIO(LD)/EOF	26.524,9	26.019,6	1,9	2.354,6	2.023,0	2.179,7	2.339,4	(6,8)	26.525,0
ELÉTRICO	6.720,3	7.877,4	(14,7)	627,9	525,0	282,0	283,2	(0,4)	6.720,2
TOTAL	33.245,2	33.897,0	(1,9)	2.982,5	2.548,0	2.461,7	2.622,6	(6,1)	33.245,2
- LINGOTAMENTO									
CONVENCIONAL	317,3	484,6	(34,5)	24,5	21,1	20,2	22,6	(10,6)	317,3
CONTÍNUO	32.899,0	33.382,6	(1,4)	2.955,5	2.524,9	2.439,2	2.597,4	(6,1)	32.899,0
- AÇO P/FUNDIÇÃO	28,9	29,8	(3,0)	2,5	2,0	2,3	2,6	(11,5)	28,9

Figura 1. 1- Produção de aço bruto por processo de fabricação. (IABr – Instituto Aço Brasil)

Na Aperam South America o ferro-gusa produzido via altos-fornos representa 85% da matéria-prima utilizada pela Aciaria para produção dos aços carbono e elétricos, e 35% da matéria-prima para produção dos aços inoxidáveis (sucata fundida no FEA's representa 65% da carga). O impacto do ferro-gusa no custo final do aço está apresentado na figura 1.2.

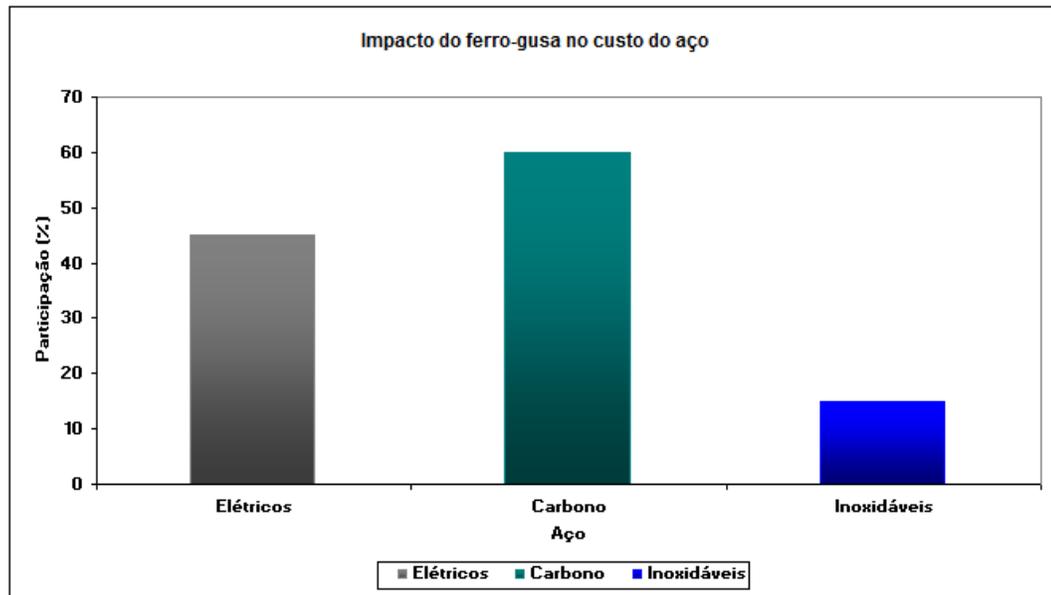


Figura 1. 2 - Participação do ferro-gusa na composição do custo final do aço.

Em função da grande participação do ferro-gusa na composição do custo final do aço, principalmente na produção dos aços elétricos (45%) e nos aços carbono (60%) é fundamental reduzir o custo da produção do ferro-gusa.

Uma das formas de reduzir o custo de produção é aumentando o rendimento do ferro-gusa. O rendimento é calculado a partir da relação do peso da produção calculada dos altos-fornos e do ferro-gusa recebido na Aciaria. A representação matemática para o cálculo do rendimento do ferro-gusa está mostrado na equação (1.1).

$$R_{Gusa} = \frac{Gusa_{aciaria}}{Gusa_{calculado}} \quad (1.1)$$

Onde:

R_{Gusa} : rendimento do ferro gusa;

$Gusa_{aciaria}$: ferro-gusa recebido na aciaria;

$Gusa_{calculado}$: produção calcula do ferro-gusa.

A perda de rendimento do ferro-gusa tem como variáveis: o peso do ferro-gusa solidificado nas lingotadeiras ou nas baias de sucatamento e perdas de peso no processo. A figura 1.3 apresenta o rendimento do ferro-gusa.

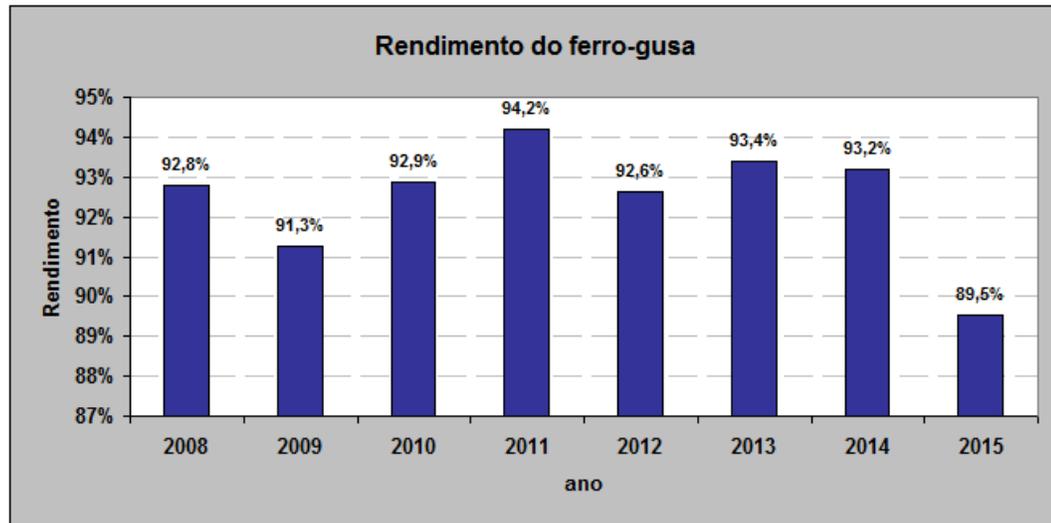


Figura 1. 3 - Rendimento do ferro-gusa entre os anos de 2008 a 2015. (Aperam South America, 2015)

Impulsionado pela queda do rendimento em 2015, este trabalho objetivou desenvolver um balanço de massa que contemplasse principalmente a produção do ferro-gusa nos altos-fornos e os processos de refino do ferro-gusa na Aciaria, a fim de entender quais os principais motivos da queda do rendimento.

2 – OBJETIVO

Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um balanço de massa que integre as a produção do ferro-gusa nos altos-fornos e os processos de refino do ferro-gusa na Aciaria.

Objetivos específicos

- Definir quais variáveis afetam o rendimento do ferro-gusa;
- Avaliar o efeito da qualidade do ferro-gusa nas etapas de refino;

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Aperam South America

A Aperam South America foi Fundada em 1944, com o nome Acesita (Aços Especiais de Itabira), e está localizada na cidade de Timóteo (MG), na região conhecida como Vale do Aço.

Com capacidade de produção atual instalada de 850 mil toneladas/ ano de aço líquido, a Aperam passou por três grandes expansões. Nas duas primeiras, passou a produzir aços carbono comum e ligado e aços elétricos. Em 1977, durante a terceira fase de expansão, iniciou a produção de aços inoxidáveis, tornando-se a única fabricante de aços planos inoxidáveis da América do Sul.

Desde Janeiro de 2011, quando a Assembléia Geral Extraordinária de Acionistas da ArcelorMittal aprova, em Luxemburgo, o desmembramento do segmento inox do grupo Arcelor, surge oficialmente a Aperam South America. Uma empresa independente, com foco exclusivo nos segmentos de aços inoxidáveis e especiais.

A empresa detém avançada tecnologia em três linhas de produção:

- **Aços Inoxidáveis** – aços com aplicação no setor automotivo, óleo e gás, construção civil, transporte, linha branca, saúde, alimentação, bens de capital, utilidades domésticas, cutelaria, mobiliário urbano e agricultura de precisão;
- **Aços Elétricos** – aços com aplicação nas indústrias de transformadores, motores elétricos, compressores herméticos, geradores de energia, reatores e reprocessadores. São formados pelas linhas GO (Grão Orientado) e GNO (Grão Não-Orientado);
- **Aços Carbono especiais** – aços com aplicação nas indústrias de máquinas, automóveis, caminhões, implementos agrícolas, ferramentas e no setor de relaminação.

A Aperam é uma empresa integrada com as seguintes grandes áreas: Redução (Altos-Fornos), Aciaria (elétrica e a oxigênio) e Laminação (a quente e a frio). A figura 3.1 apresenta o fluxograma de produção da Aperam.

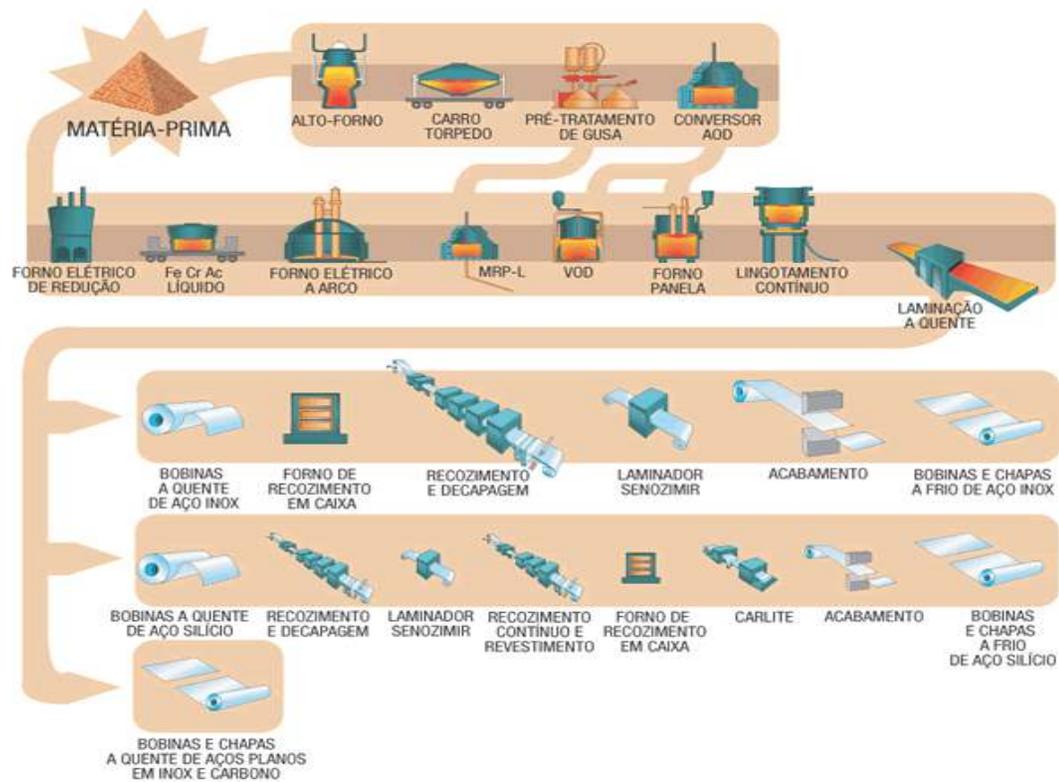


Figura 3. 1 - Fluxo de Produtivo da Aperam South America. (Aperam South America, 2014)

Redução: É composta por uma ampla área de pátios de matéria-prima e dois Altos-Fornos que produzem 1.650 toneladas de gusa/dia, operados com carvão vegetal;

Aciaria: Com uma capacidade de 850.000 toneladas de aço líquido por ano, é uma área bastante complexa que envolve os seguintes equipamentos:

- **PTG:** estação de Pré-Tratamento do Gusa que tem a capacidade de realizar operações como a de dessiliciação, desfosforação e dessulfuração. Neste processo o teor de silício do gusa é reduzido pela adição de agentes dessilicantes como a carepa. Os tratamentos de dessulfuração e desfosforação

do gusa reduzem os teores de enxofre e de fósforo via adição de agentes dessulfurantes e desfosforantes respectivamente;

- **FEA:** são dois Fornos Elétricos a Arco, que fundem a sucata e ligas utilizadas na produção de aços inoxidáveis;
- **AOD-L:** convertedor utilizado para a produção somente de aços inoxidáveis;
- **MRP-L:** convertedor utilizado para a produção de aços carbono, elétricos e inoxidáveis;
- **VOD:** são dois fornos que realizam a desgaseificação e descarburização dos aços carbono, elétricos e inoxidáveis;
- **Forno Panela:** forno utilizado para fazer ajustes finos de temperatura e composição química dos aços;
- **Lingotamento Contínuo:** são duas máquinas de lingotamento de placas dos aços carbono, elétricos e inoxidáveis.

LTQ: A Laminação de Tiras a Quente produz as bobinas e chapas a quente de planos, sendo composta de dois fornos de aquecimento, dois laminadores e uma bobinadeira.

LTF: A Laminação de Tiras a Frio possui duas unidades sendo uma para a laminação de bobinas a frio de aço Inox e outra para a laminação de bobinas a frio de aço elétricos.

3.2 – Produção do ferro-gusa

3.2.1 – Princípio de funcionamento do alto-forno

O alto-forno do ponto de vista físico-químico é um grande trocador de calor em contracorrente. Os gases quentes ascendentes trocam calor e reduzem as camadas de carga metálica que se deslocam no sentido contrário. Além do fluxo dos gases o alto-forno é um complexo reator químico, envolvendo as fases sólidas, líquidas e gasosas (GEERDES *et al.*, 2009).

De acordo com CASTRO (1997), grandes avanços no conhecimento do estado interno dos altos-fornos ocorreram com as experiências de dissecação deste equipamento, realizados pelos japoneses e russos. As experiências confirmaram a existência de três zonas distintas dentro dos fornos:

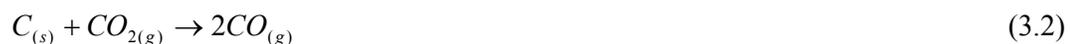
- **zona granular:** zona onde a carga metálica (sinter e/ou pelota e/ou minério) e o termo-redutor (carvão vegetal e/ ou coque) e mais fundentes descem sólidos, divididos em camadas e em contra corrente com os gases. Nesta região pode ocorrer uma excessiva degradação da carga por deficiência de qualidade das matérias-primas, afetando a permeabilidade e o fluxo gasoso ascendente.
- **zona de amolecimento e fusão:** zona onde inicia o amolecimento e a fusão da camada de carga metálica e dos fundentes. À região é constituída de camadas do termo-redutor e camadas coesivas.
- **zona de gotejamento (carbono ativo):** zona onde o metal e a escória, já líquidos, escoam através de um empilhamento de coque (ou carvão vegetal), em contra corrente com os gases. A zona de gotejamento engloba o homem morto e a zona de combustão. O homem morto é a coluna de coque (ou carvão vegetal) por onde o metal e a escória gotejam, e que alimenta a zona de combustão.

A figura 3.2 descreve através de um desenho esquemático a divisão do alto-forno por zonas.



Figura 3. 2 - Esquema da região interna do alto-forno. (CASTRO, 1997)

A natureza do processo de contra-corrente permite que o ar pré-aquecido seja soprado pelas ventaneiras do alto-forno entrando em contato com o combustível no *raceway* (zona de combustão). O contato do oxigênio do ar com o carbono do combustível aquecido provoca inicialmente a reação de formação do dióxido de carbono (CO_2) equação (3.1). Essa reação, altamente exotérmica, produz grande quantidade de calor para o processo. O dióxido de carbono reage instantaneamente com o carbono do combustível formando monóxido de carbono (CO) equação (3.2), essa reação é endotérmica e conhecida como: reação de *solution loss* ou *Boudouard* (PEACEY *et al.*, 1979).



A figura 3.3 apresenta o equilíbrio entre o CO e o CO₂, onde a linha traçada indica o equilíbrio das reações de *Boudouard*. Desta forma, sob altas temperaturas (acima de 1.100°C) todo o CO₂ é convertido em CO.

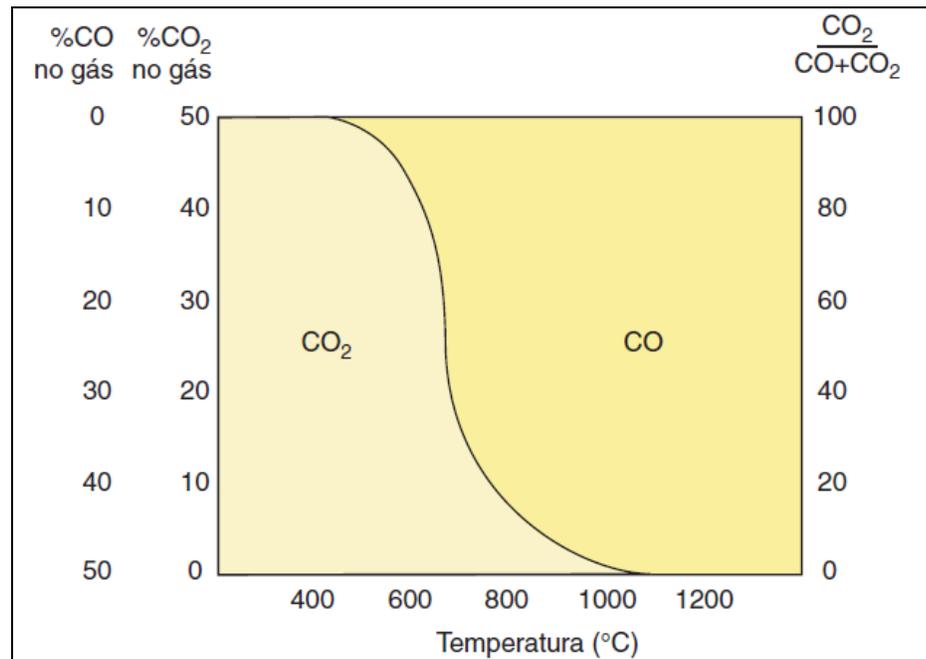


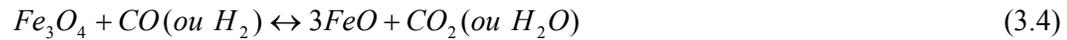
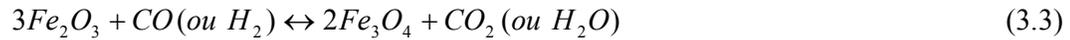
Figura 3. 3 - Equilíbrio entre CO e o CO₂. (GEERDES et al., 2009)

A umidade (H₂O) contida no ar soprado reage com o carbono do combustível, gerando os gases redutores CO e H₂. Embora essa reação também seja endotérmica, como o volume global de H₂O no ar soprado é baixo, o resultado efetivo associado à saída dos gases redutores do raceway é o aporte de grandes quantidades de calor para a seqüência do processo. Durante o restante do seu trajeto no forno, o gás ascendente suprará calor para as camadas de carga metálica descendentes, deixando o topo do forno com temperaturas da ordem de 100°C (GEERDES *et al.*, 2009).

Para BISWAS (1981) a redução do minério de ferro pode ocorrer via redução pelo gás ou redução direta. A composição química do gás e a temperatura definem os limites das reações de redução.

As equações (3.3) a (3.5) são chamadas de redução indireta (redução pelo gás), sendo a reação global medianamente exotérmica. Se alguma wustita permanece não reduzida

pelas reações indiretas, ela é posteriormente reduzida por redução direta na região onde as temperaturas excedem a 1.100°C, equação (3.6) (GANDRA, 2006).



A figura 3.4 mostra o equilíbrio entre os vários óxidos de ferro e o gás. A figura mostra em quais níveis de temperaturas e composições do gás uma redução do óxido de ferro poderá ocorrer ou não. A wustita requer a mais alta concentração de CO, sendo reduzida pelo gás numa região com temperatura entre 900 e 1.100°C. Para temperaturas maiores que 1.100°C a redução é direta devido à ausência do CO₂.

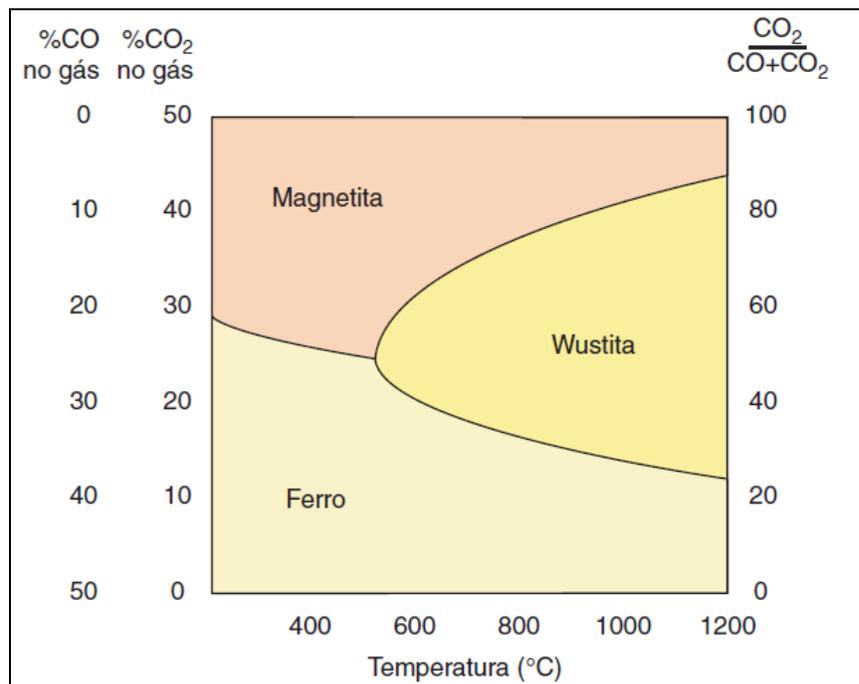


Figura 3. 4 - Apresentação esquemática da relação entre os óxidos de ferro, composição do gás e temperatura. (GEERDES *et al.*, 2009)

De acordo com GEERDS (2009), num alto-forno moderno a redução direta é responsável por remover aproximadamente um terço do oxigênio da carga, sendo dois terços removidos pela redução indireta (redução pelo gás). O aumento da taxa de redução direta acelera a descida de carga do alto-forno, consumindo a reserva térmica (a redução direta requer grandes quantidades de energia), acarretando no resfriamento do alto-forno.

3.2.2 – Produtividade do Alto-Forno

A produção de um alto-forno está diretamente correlacionada com a quantidade de carbono oxidado em frente às ventaneiras. Em uma situação estacionária, o ferro-gusa é produzido assim que o carbono é consumido. (GEERDES *et al.*, 2009)

A produtividade de um alto-forno para BIWAS (1981) e CASTRO (1997) pode ser entendida como a quantidade de calor gerada nas ventaneiras, dividido pela quantidade de calor necessária para a produção de uma tonelada de gusa, de acordo com a expressão (3.7).

$$P(t/h) = \frac{Q(kcal/h)}{q(kcal/t)} \quad (3.7)$$

Onde:

$P(t/h)$ = produtividade de gusa do alto-forno;

$Q(kcal/h)$ = quantidade de calor gerada nas ventaneiras;

$q(kcal/t)$ = quantidade de calor necessária para produzir uma tonelada de gusa.

Como o calor gerado no processo do alto-forno é proveniente das reações de oxidação do carbono (contido no coque ou carvão vegetal). A expressão (3.7) pode ser escrita em função do consumo de combustível, conforme a expressão (3.8).

$$P(t/h) = \frac{C(kg/h)}{c(kg/t)} \quad (3.8)$$

Onde:

$P(t/h)$ = produtividade de gusa do alto-forno

$C(kg/h)$ = quantidade de queimada por hora

$c(kg/t)$ = quantidade de carbono necessária para produzir uma tonelada de gusa

De acordo com CASTRO (1997) para se atingir o objetivo de maior produtividade deve-se ter o máximo de carbono queimado por hora e o mínimo consumo de carbono por tonelada de gusa, sendo que a permeabilidade da carga impacta diretamente na queima de carbono por hora e a eficiência da redução dos óxidos pode aumentar ou diminuir o consumo de carbono por tonelada de gusa.

3.2.3 – Composição do ferro-gusa e formação da escória

Os principais elementos dissolvidos no ferro-gusa são oriundos da ganga dos minérios, dos fundentes carregados e do combustível utilizado. A composição química final do ferro-gusa é o resultado de um processo de interações entre o ferro-gusa e a escória. Os elementos são dispersos entre a escória e o ferro-gusa em função da composição química da escória e da temperatura do ferro-gusa. A figura 3.5 apresenta a composição química típica do ferro-gusa e da escória. (GEERDES *et al.*, 2009)

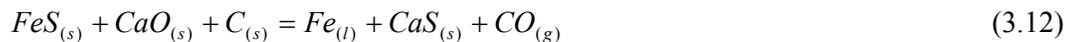
Metal quente		Típico	Escória	Típico	Faixa
Ferro	Fe	94,5%	CaO	40%	34–42%
Carbono	C	4,5%	MgO	10%	6–12%
Silício	Si	0,40%	SiO ₂	36%	28–38%
			Al ₂ O ₃	10%	8–20%
Manganês	Mn	0,30%			
Enxofre	S	0,03%	Soma	96%	
Fósforo	P	0,07%	Enxofre	1%	

Figura 3. 5 - Composição química típica do ferro-gusa e da escória. (GEERDES *et al.*, 2009)

Os elementos considerados impurezas são reduzidos nas regiões de alta temperatura dentro do alto-forno. De acordo com ARAUJO (1997) os óxidos de manganês, fósforo e silício reduzem para o ferro-gusa a partir da temperatura de 1200°C. As equações (3.9), (3.10) e (3.11) apresentam as reações de redução.



ARAUJO (1997) afirma ainda que os óxidos de cálcio, alumínio e de silício, unem-se para formar a escória. E o processo de dessulfuração (remoção do enxofre) ocorre a temperatura de 2000°C, onde o sulfeto de ferro é transformado em sulfeto de cálcio, de acordo com a equação (3.12).



A escória é formada a partir da ganga da carga e da cinza do combustível. A escória evolui para a escória final à medida que as reações ocorrem dentro do alto-forno. Quatro principais elementos compõem aproximadamente 96% da escória: Sílica (SiO₂), óxido de magnésio (MgO), óxido de cálcio (CaO) e alumina (Al₂O₃). Os 4% restantes são compostos no geral por: óxido de manganês (MnO), titânia (TiO₂), enxofre (S) e óxido de fósforo (P₂O₅). Estes componentes tendem a abaixar a temperatura de *liquidus* da escória (GEERDES *et al.*, 2009).

A acidez da escória é controlada pela presença de óxidos básicos. O conceito de basicidade é a razão entre os óxidos básicos e os óxidos ácidos. Em geral a basicidade da escória é calculada da forma binária (B2), ternária (B3) ou quartenaria (B4).

- B2: CaO/SiO₂
- B3: CaO/SiO₂+Al₂O₃
- B4: CaO+MgO/SiO₂+Al₂O₃

3.3 – Refino do ferro-gusa

De acordo com KOROS (1998) o processo de refino do ferro-gusa ou pré-tratamento do ferro-gusa (PTG) trata-se do ajuste da composição química e da temperatura para o processamento nos convertedores. A remoção prévia do enxofre e fósforo permite a produção de aços com teores desses elementos extremamente baixos, sem afetar o tempo de processo e o consumo de fluxantes no convertedor. O ajuste no teor de silício é fundamental para preservação do refratário do convertedor e para redução do volume de escória. A figura 3.6 apresenta a evolução dos processos de refino no decorrer dos anos.

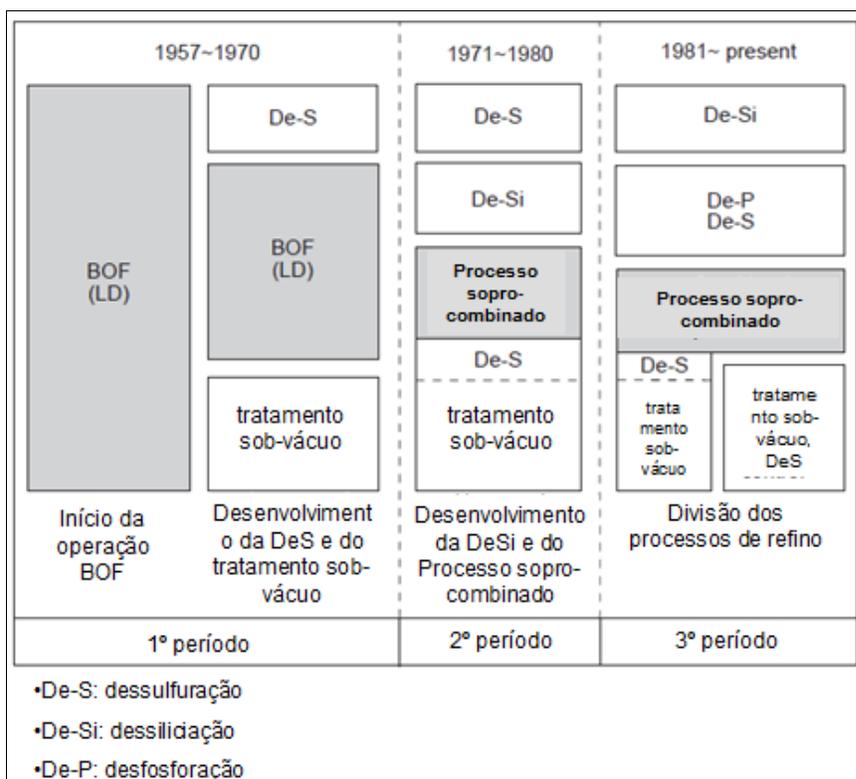


Figura 3. 6 - Evolução dos processos de refino no decorrer dos anos. (KOROS, 1998)

A evolução nos processos de refino do ferro-gusa permitiu a fabricação de aços complexos e de alto grau de pureza.

Os processos para remoção do fósforo e do silício consomem oxigênio, ocorrendo à redução do carbono dissolvido no ferro-gusa. A figura 3.7 apresenta a evolução do fósforo, silício e carbono em função do consumo de oxigênio.

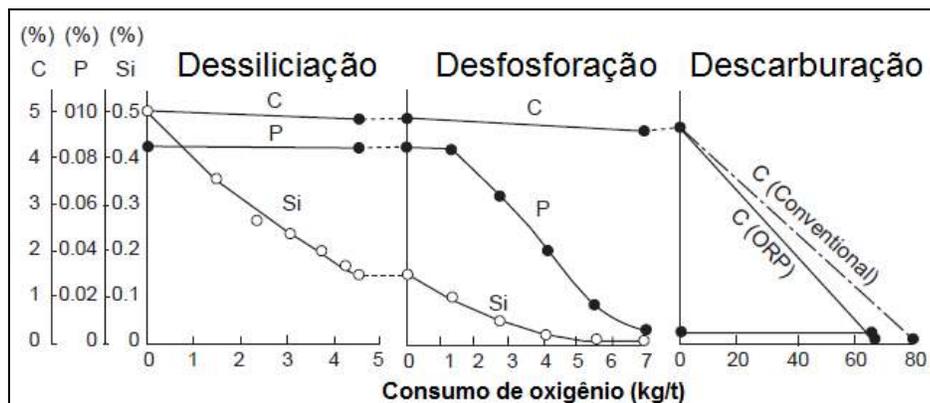


Figura 3. 7 - Evolução do fósforo, silício e carbono em função do consumo de oxigênio. (KOROS, 1998)

O processo utilizado para refino do ferro-gusa é definido em função do tipo de refino desejado, pois cada tipo de refino apresenta características físico-químicas diferentes, conforme apresentado na tabela III.1.

Tabela III. 1– Característica físico-química dos tipos de refino do ferro-gusa.

Operação de refino	Atmosfera	Escória	Refratário	Temperatura	Local	Equipamento
DESSILICIAÇÃO	Oxidante	Independente	Independente	Independente	Seio do banho ou Superfície Metal/escória	Canal de corrida/ Carro-torpe/ Painela/ Convertedor
DESFOFORAÇÃO	Oxidante	Básica	Básica	Baixa	Seio do banho ou Superfície Metal/escória	Carro-torpe/ Painela/ Convertedor
DESSULFURAÇÃO	Redutora	Básica	Básica	Alta	Superfície Metal/escória ou Sólido/ metal	Carro-torpe/ Painela/ Convertedor
DESCARBURAÇÃO	Oxidante	Independente	Independente	Alta	Superfície Gás/ metal	Painela/ Convertedor

3.3.1 – Dessiliciação

O silício é considerado nocivo ao convertedor para teores altos (acima de 0,6 %), o que vai provocar uma maior adição de fundentes, aumentando a incidência de projeções e conseqüentemente riscos operacionais e redução do rendimento metálico no processo. Por outro lado um teor de silício muito baixo (< 0,15 %) reduz o balanço térmico do convertedor reduzindo a adição de sucata. Controlar o teor de silício numa faixa mais estreita traz vantagens ao processo de fabricação do aço (ARAUJO, 1997).

A etapa de dessiliciação pode ser feita no canal de corrida do alto forno, no carro torpedo ou na transferência do ferro-gusa do carro-torpedo para a panela, que é o mais comum. O material utilizado é algum agente contendo óxido de ferro, como carepa de laminação, carepa de lingotamento contínuo, pó do sistema de desempoeiramento, finos de sinter e de minério de ferro. Geralmente o material é fino (< 10 mm) para ocorrer uma maior interface de reação, melhorando o rendimento do processo (ANK, 2009).

A principal reação da dessiliciação está representada na equação (3.13)



3.3.2 – Desfosforação

De acordo com ROSENQUIST (1986) o fósforo é o único elemento presente nas cargas do alto-forno que passa totalmente para o ferro-gusa. Sua distribuição não pode ser melhorada através de mudanças nas condições operacionais do alto-forno, e a quantidade desse elemento no ferro-gusa depende diretamente do seu teor presente no minério de ferro utilizado. Dessa forma o fósforo deverá ser removido na etapa de beneficiamento do minério ou nas etapas de fabricação do aço.

Para KOROS (1998) a remoção do fósforo nos processos de refino do ferro-gusa só é possível quando o teor de silício está abaixo 0,15%. Devido à alta afinidade do silício pelo oxigênio, a presença desse elemento bloqueia a reação do fósforo com o oxigênio.

A equação (3.14) apresenta a reação de oxidação do fósforo pelo oxigênio.



A distribuição do fósforo entre a escória e o metal (partição do fósforo) é proporcional à atividade do oxigênio dissolvido. Sendo assim, a partição do fósforo cresce a medida que se aumenta a quantidade dos seguintes óxidos: Fe₂O₃, FeO e CaO. A escorificação do fósforo está apresentada na equação (3.15).



3.3.3 – Dessulfuração

O enxofre presente no ferro-gusa é oriundo principalmente do coque, mas também pode estar presente no minério de ferro. A eliminação do enxofre no alto-forno é bem expressiva devido ao ambiente redutor, entretanto os teores de enxofre conseguidos no ferro-gusa líquido não atendem às especificações para aços especiais. (TURKDONGAN, 1996).

Conforme KOROS (1998) a remoção do enxofre em ambientes com atmosfera oxidantes não é possível devido o fato da escória não conseguir atingir o equilíbrio metal/ escória para obter-se uma alta partição do enxofre.

O cálcio (Ca) é o principal elemento responsável pela dessulfuração, assim a equação (3.16) apresenta a reação geral da dessulfuração.



3.3.4 – Refino do ferro-gusa no convertedor MRP-L

Trata-se de um convertedor tipo BOF (Basic Oxygen Furnace) de sopro combinado, ou seja, a injeção de gases (oxigênio e gás inerte) para a fabricação de aços se dá pela lança e através de elementos de injeção localizados no fundo do vaso.

Um dos mais importantes sistemas deste equipamento é a agitação do banho metálico promovida pela injeção de gases inertes pelos plugues, dispostos no fundo do convertedor, com o objetivo de garantir a agitação do banho metálico na fase de sopro e resopro.

Segundo ATHAYDE JUNIOR (2005), na produção de aços em convertedores que apresentam o sistema de agitação de gases inertes pelo fundo, como o próprio MRP-L, o principal objetivo da agitação de gases inertes é minimizar as deficiências de agitação do banho metálico, principalmente na fase final de sopro, favorecendo a cinética das reações. As vantagens deste processo em relação ao convertedor LD convencional com apenas o sopro de oxigênio pelo topo são:

- Melhoria do rendimento metálico devido menor %Fe total na escória;
- Melhoria da partição de fósforo e enxofre entre metal e escória;
- Melhoria da qualidade dos produtos devido a redução do % de oxigênio dissolvido no metal;
- Possibilidade da produção de aços com teores muito baixos de carbono sem a superoxidação do metal e escória;
- Baixos teores de nitrogênio no aço;
- Melhor controle do sopro;
- Alta reprodutibilidade.

A figura 3.8 mostra o desenho esquemático de um convertedor tipo BOF (MRP-L) da usina Aperam South America

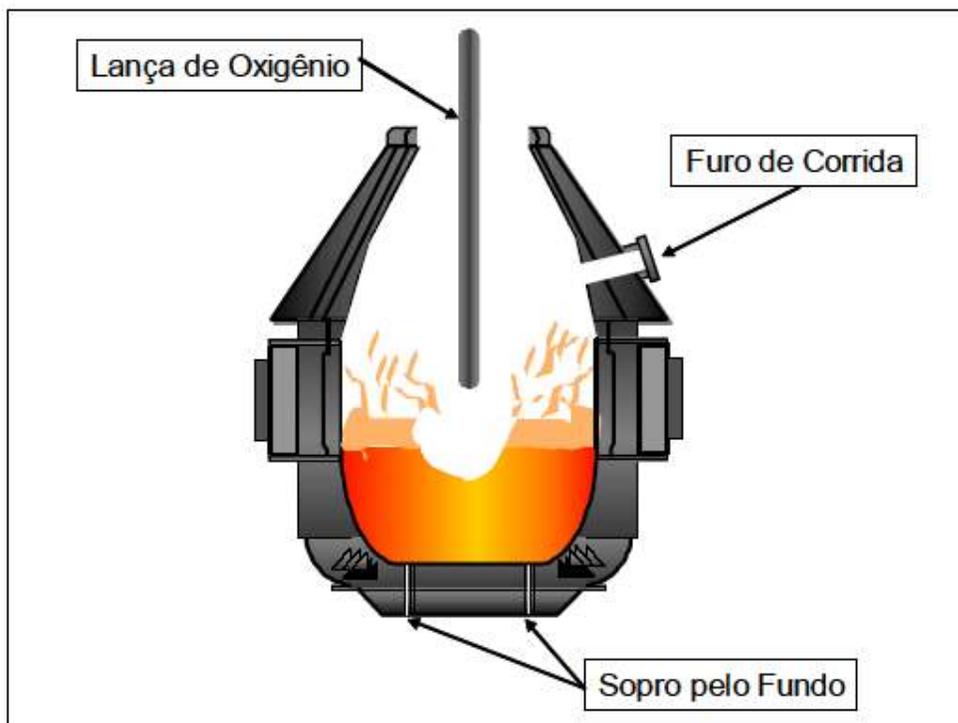


Figura 3. 8 - Desenho ilustrativo do convertedor BOF (MRP-L). (BARÃO, 2007)

Nos processos de produção de aço em Aciaria a oxigênio, impurezas como o carbono (C), silício (Si), manganês e (Mn) dissolvidos no gusa são removidos pela oxidação para produzir o aço líquido. As reações de oxidação resultam na formação de CO , CO_2 , SiO_2 , MnO , e óxidos de ferro. A maioria destes óxidos são dissolvidos com a adição de fundentes no convertedor, principalmente a cal (CaO), para formar uma escória líquida capaz de remover o enxofre (S) e fósforo (P) do metal. Os óxidos gasosos, constituídos por cerca de 90% de CO e 10% de CO_2 , ao sair do forno transportam pequenas quantidades de óxido de ferro e pó de cal para o sistema de desempoeiramento (MILLER, 1998).

A figura 3.9 apresenta a oxidação dos elementos dissolvidos no gusa durante o sopro de oxigênio.

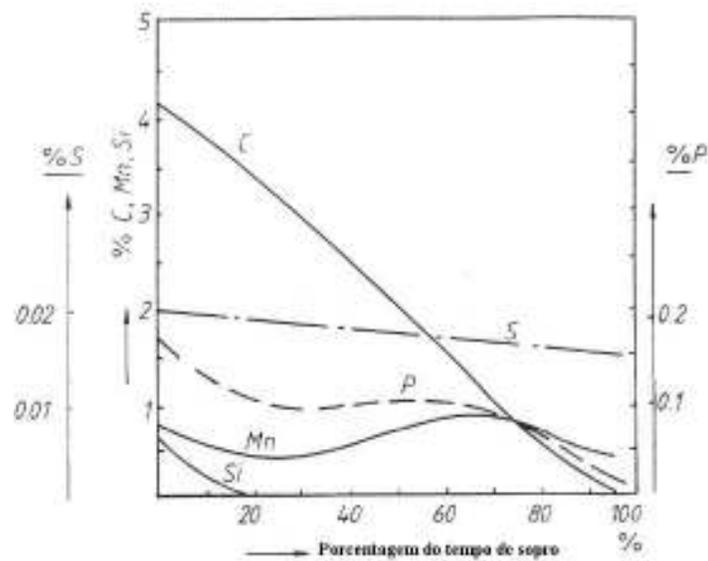


Figura 3. 9- Oxidação dos elementos durante o sopro de oxigênio. (DEO & BOOM, 1993)

3.3.5 – Refino do ferro-gusa no convertedor AOD-L

O principal objetivo do convertedor AOD é promover a oxidação seletiva do carbono sem uma excessiva oxidação de cromo. A oxidação do carbono ocorre através do sopro de oxigênio pela lança de topo e pela injeção de oxigênio e gás inerte pelas ventaneiras instaladas na lateral do convertedor.

De acordo com MARIN (2006) o processo AOD permite obter os seguintes benefícios na produção de aços inoxidáveis: “limpidez do aço”, boa capacidade de dessulfuração, alto rendimento metálico, baixo tempo de processo, facilidade operacional e flexibilidade na produção de diversos tipos de aço.

A Figura 3.10 mostra um convertedor AOD-L já com a evolução de utilização de lança de topo para aumentar a taxa de descarburização e conseqüente produtividade do processo.

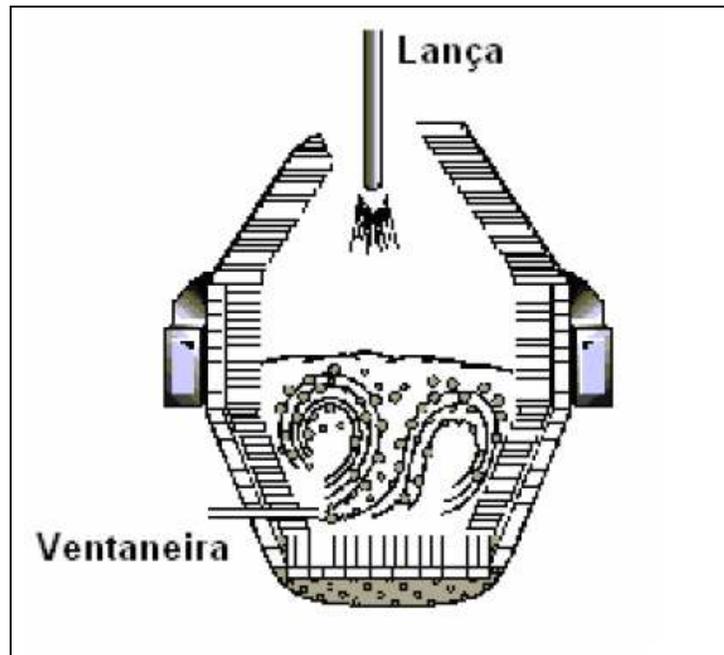


Figura 3. 10 - Desenho esquemático do AOD-L. (MARIN, 2006)

No conversor AOD-L, o aço pode ser produzido em duas diferentes rotas denominadas de “duplex” e “triplex”. A rota “duplex” é a principal. Nesta rota o aço é descarburado pelo AOD-L e os ajustes finais de composição química e temperatura são realizados na metalurgia de panela. Já na rota “triplex”, o aço é parcialmente descarburado no AOD-L e a descarburagem final e o refino do aço ocorre num desgaseificador a vácuo (VOD).

Segundo FELIX FILHO (2009) o processo de refino em conversor AOD pode ser dividido em fases, com o objetivo de maximizar a eficiência da descarburagem e reduzir a oxidação de cromo. As fases são caracterizadas pela vazão dos gases soprados pelas ventaneiras e lança de topo e pelas matérias-primas adicionadas.

A fase inicial denominada homogeneização consiste em um sopro de gás inerte pelas ventaneiras, tendo como finalidade garantir a homogeneização térmica e química do metal líquido carregado no AOD.

Em seguida inicia-se a fase descarburagem, dividida em duas etapas:

- Etapa 1 - sopro de oxigênio via lança de topo;
- Etapa 2 - sopro de oxigênio e gás inerte via ventaneiras.

Após a fase de descarburização é realizada a redução dos metais oxidados. Esta fase é denominada redução e tem como objetivo recuperar os metais oxidados durante o processo de descarburização. A fase de redução é realizada através da adição de elementos químicos redutores, silício ou alumínio, e pelo sopro de argônio pelas ventaneiras para agitação do banho. Nesta etapa do processo ocorre também a remoção de nitrogênio e enxofre do banho metálico.

Além das fases descritas, as fases de resopro e resfriamento com gás inerte auxiliam no processamento das corridas, principalmente para controle da temperatura e carbono final de sopro.

3.5 - Definição de balanço de massa

O balanço de massa para processo metalúrgico está baseado na seguinte expressão: a matéria não pode ser criada ou destruída em um dado sistema. Matematicamente, essa expressão pode ser colocada conforme a equação (3.18).

$$\sum Massa_{Entrada} = \sum Massa_{Saída} + \sum Massa_{Acumulada} \quad (3.18)$$

De modo geral, nos processos metalúrgicos contínuos ou em bateladas, não existem acumulações de massa, podendo igualar as entradas e saídas de massa. Acumulações de massa podem ocorrer em processos contínuos em curtos períodos de tempo (acumulações positivas ou negativas). Em longo prazo a acumulação deverá ser nula.

Segundo CASTRO *et all* (1985) para o desenvolvimento de um balanço de massa é necessário conhecer os seguintes dados: pesos e análises químicas de todos os materiais carregados e produzidos no sistema.

As principais causas de erros que impedem o fechamento exato de um balanço de massa são:

- erros de pesagem;
- erros de análise química;
- erros de amostragem;
- erros de equipamentos;
- erros de considerações (variáveis imensuráveis);

O balanço de massa de um determinado sistema compõe o modelo matemático, melhorando o controle do processo. Desvios no processo podem ser atribuídos aos modelos matemáticos, quando na verdade o modelo propaga os erros já existentes nas informações fornecidas. Identificar os erros inseridos nas variáveis e minimizá-los é fundamental para o bom funcionamento do modelo matemático.

O balanço de massa aplicado a processos industriais pode ter varias finalidades. Dentre elas estão:

- cálculo da carga a ser usado num dado processo;
- cálculo do consumo de insumos;
- determinação de períodos de acumulações positivas ou negativas de determinados compostos;
- distúrbios nos equipamentos;
- desvios no processo.

Para ÂNGELO (2013) o balanço de massa do Alto-Forno pode ser feito por regiões, tratando cada região como sistema isolado ou um balanço de massa global, contemplando todas as regiões.

O balanço de massa da zona de combustão é um exemplo do balanço de massa por região. Esse cálculo é fundamental para o cálculo do balanço térmico da zona de combustão, temperatura de chama e balanço térmico global do Alto-Forno.

O cálculo do leito de fusão (balaço de massa global do Alto-Forno) permite prever o volume de produção de gusa, volume de produção de escória, composição química do gusa, composição química da escória, composição química do gás de topo e simular vários cenários de acordo com a demanda do Alto-Forno. (GEERDES, 2009)

O balanço de massa aplicado ao convertedor tem como principal finalidade a determinação do volume de oxigênio necessário ao processo. A massa de fundentes a ser adicionado para garantir a qualidade da escória e o volume de escória a ser gerada no processo também pode ser obtida através do balanço de massa. (CASTRO *et all*, 1985)

4 – METODOLOGIA

4.1 – Equipamentos

Os principais aspectos técnicos dos equipamentos envolvidos neste trabalho estão apresentados nas tabelas IV.1 e IV.2.

Tabela IV. 1 - Aspectos técnicos dos Altos-Fornos

PARÂMETROS	UNIDADE	ALTO FORNO 01	ALTO FORNO 02
Início de operação	Ano	1949	1979/
Fabricante	-	MCKEE	VAI
Produtividade	ton/dia/m ³	2,3	2
Volume de trabalho	m ³	328	558
Produção	ton/dia	650	1150
Ventaneiras	nº	12	16
Sistema de carregamento	-	Skip	Paul Wurth

Tabela IV. 2 - Aspectos técnicos da Estação de Pré-Tratamento do Gusa (PTG).

PARÂMETROS	UNIDADE	PTG
Início de operação	ano	1996
Fabricante	-	PAUL WHURTH / SUMITOMO
Capacidade	ton/ corrida	75
Tipo de Refino	-	De-Si / DeP / De-S
Numero de estação	nº	2

4.2 – Rota do ferro-gusa

Na Aperam South America o ferro-gusa produzido pelos altos-fornos e encaminhado para Aciaria passa por etapas de refino diferentes, determinadas pelo tipo de aço a ser produzido nos convertedores. Os processos de refino são:

- dessiliciação (De-Si): ajuste do teor de silício dissolvido no ferro-gusa;
- dessulfuração (De-S): ajuste do teor de enxofre dissolvido no ferro-gusa;
- desfosforação (De-P): ajuste do teor de fósforo dissolvido no ferro-gusa.

Para produção dos aços carbono e elétricos, o ferro-gusa é submetido ao processo de dessiliciação (De-Si), onde o objetivo do refino é reduzir o teor do silício dissolvido no ferro-gusa para valores especificados nos procedimentos técnicos da Aperam. Definiu-se esse procedimento como ROTA 1. A figura 4.1 apresenta de forma esquemática o fluxo do ferro-gusa na ROTA 1.

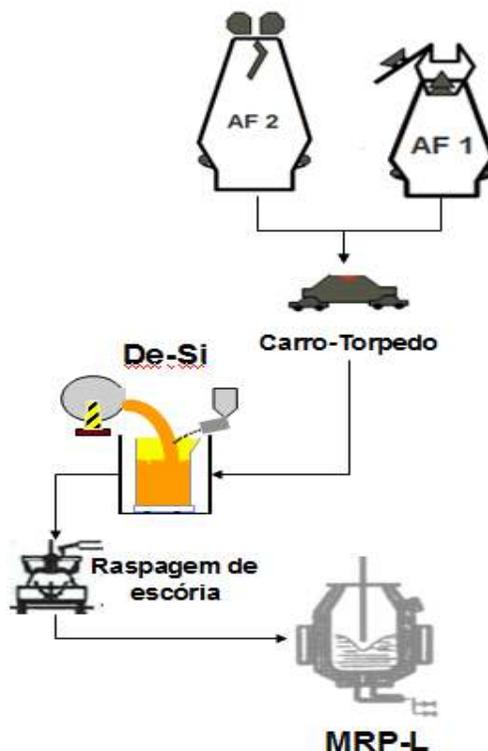


Figura 4. 1- Fluxo do ferro-gusa na ROTA 1.

Para produção dos aços inoxidáveis, o ferro-gusa é submetido ao processo de dessiliciação, onde o teor de silício dissolvido no ferro-gusa é reduzido para valores inferiores a 0,15%. Atendido o valor do silício, o ferro-gusa é encaminhado para o processo de desfosforação (De-P), onde o objetivo do refino é reduzir o teor do fósforo dissolvido para valores especificados nos procedimentos técnicos da Aperam. Definiu-se esse procedimento como ROTA 2. A figura 4.2 apresenta de forma esquemática o fluxo do ferro-gusa na ROTA 2.

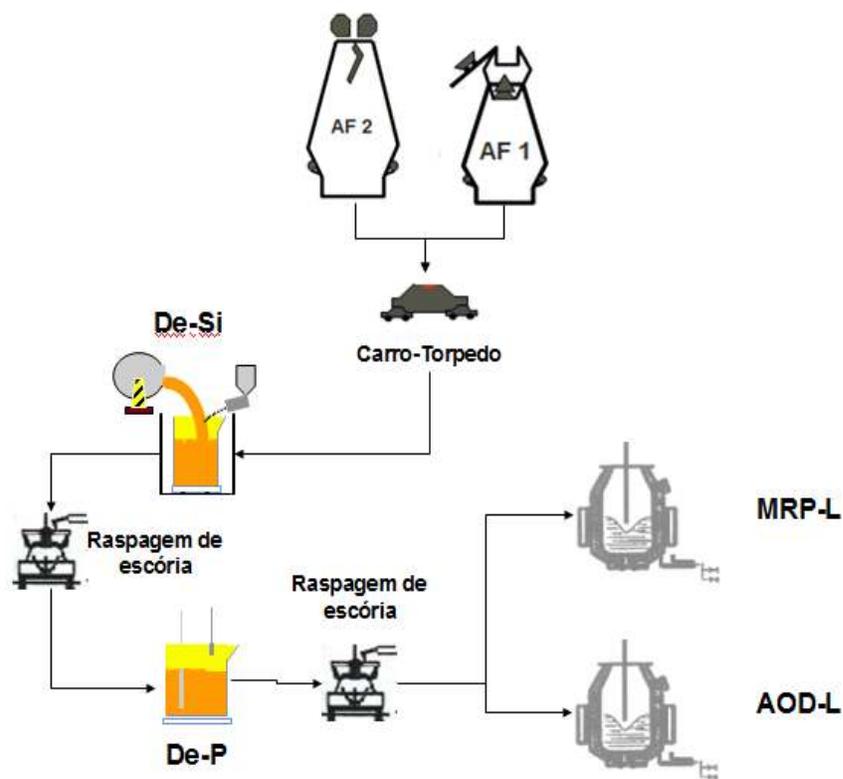


Figura 4. 2 - Fluxo do ferro-gusa na ROTA 2.

Em função do baixo teor de enxofre dissolvido no ferro-gusa produzido pelos altos-fornos, a etapa de dessulfuração (De-S) foi desativada no ano de 2012. Não sendo estudada neste trabalho.

4.3 – Base de dados

Altos-fornos

Como a Aperam South America possui dois altos-fornos com características bem distintas, faz-se necessário trabalhar com informações de cada alto-forno e ajustar o balanço de massa para cada um. O banco de dados utilizado para construção dos balanços de massa é composto de informações diárias de consumos reais dos altos-fornos, e com informações da qualidade química da carga metálica, fundentes e redutores.

Na preparação dos dados, foram excluídos os “outliers”, que são os dias em que ocorreram desligamentos ou religadas dos altos-fornos, uma vez que poderiam interferir na adequação dos balanços de massa ajustados.

Os dados são referentes ao ano de 2015 e foram agrupados por mês. O objetivo desse agrupamento é reduzir a interferência do sistema de informação de processo (SIP), onde corridas produzidas em um determinado dia podem ser contabilizadas no dia posterior.

As variáveis para o cálculo do balanço de massa do alto-forno 1 estão resumidas na Tabela VI.3, e as variáveis para o cálculo do balanço de massa do alto-forno 2 estão resumidas na tabela VI.4.

Tabela IV. 3 - Variáveis do alto-forno 1.

Variáveis Entrada:					
Material		Massa	Úmidade	Ferro	Sílica
1	Cinza Carvão	(kg)	%	%	%
2	Cinza Carvão Injeção	(kg)	%	%	%
3	Cinza Small Charcoal	(kg)	%	%	%
4	Cinza do Pó Coletor	(kg)	%	%	%
5	Dolomita	(kg)	%	%	%
6	Minério F	(kg)	%	%	%
7	Minério V	(kg)	%	%	%
8	Minério S	(kg)	%	%	%
9	Cálcario	(kg)	%	%	%
10	Limalha de Gusa	(kg)	%	%	%
11	Minério Manganês	(kg)	%	%	%
12	Pelota	(kg)	%	%	%
13	Quartzo	(kg)	%	%	%
14	Sucata	(kg)	%	%	%
Material		Massa	Ferro	Silício	Sílica
	Ferro-gusa	-	%	%	-
	Escória	-	%	-	%
	Pó de coletor	(kg)	%	-	%
Resposta:					
Material	Massa				
	Ferro-gusa	(kg)			
	Escória	(kg)			

Tabela IV. 4 - Variáveis do alto-forno 2.

Variáveis Entrada:					
Material		Massa	Úmidade	Ferro	Silica
1	Cinza Carvão	(kg)	%	%	%
2	Cinza Carvão Injeção	(kg)	%	%	%
3	Cinza Small Charcoal	(kg)	%	%	%
4	Cinza do Pó Coletor	(kg)	%	%	%
5	Cinza do Coque	(kg)	%	%	%
6	Dolomita	(kg)	%	%	%
7	Minério V	(kg)	%	%	%
8	Minério F	(kg)	%	%	%
9	Minério S	(kg)	%	%	%
10	Cálcario	(kg)	%	%	%
11	Minério Manganês	(kg)	%	%	%
12	Pelota	(kg)	%	%	%
Material		Massa	Ferro	Silicio	Silica
Ferro-gusa		-	%	%	-
Escória		-	%	-	%
Pó de coletor		(kg)	%	-	%
Resposta:					
Material	Massa				
Ferro-gusa	(kg)				
Escória	(kg)				

Pré tratamento do Gusa (PTG)

Como o ferro-gusa encaminhado para Aciaria pode seguir duas rotas de refino distintas, faz-se necessário trabalhar com informações de cada rota e ajustar o balanço de massa para cada uma. O banco de dados utilizado para construção dos balanços de massa é composto de informações diárias de consumos reais da estação de Pré-tratamento do Gusa.

Na preparação dos dados, foram excluídos os “outliers”, que são os dias em que ocorreram manutenções preventivas ou preditivas, uma vez que poderiam interferir na adequação do balanço de massa.

Os dados são referentes ao ano de 2015 e foram agrupados por mês. O objetivo desse agrupamento é reduzir a interferência do Sistema de Informação de Processo (SIP), onde corridas produzidas em um determinado dia podem ser contabilizadas no dia posterior.

As variáveis para o cálculo do balaço de massa da rota 1 estão resumidas na Tabela IV.5, e as variáveis para o cálculo do balanço de massa da rota 2 estão resumidas na tabela IV.6.

Tabela IV. 5 - Variáveis para o cálculo do balaço de massa da rota 1.

Variáveis Entrada:							
Material		Massa	Ferro	Silício	Manganês	Fósforo	FeO
1	Ferro-Gusa	(kg)	%	%	%	%	-
2	Carepa de Laminação	(kg)	-	-	-	-	%
Material		Massa	Ferro	Silício	Manganês	Fósforo	FeO
Ferro-gusa _{De-Si}		-	%	%	%	%	-
Resposta:							
Material		Massa					
Ferro-gusa _{De-Si}		(kg)					

Tabela IV. 6 - Variáveis para o cálculo do balaço de massa da rota 2.

Variáveis Entrada:							
Material		Massa	Ferro	Silício	Manganês	Fósforo	FeO
1	Ferro-Gusa	(kg)	%	%	%	%	%
2	Carepa de Laminação	(kg)	%	%	%	%	%
3	Agente DeP	(kg)	%	-	-	-	-
Material		Massa	Ferro	Silício	Manganês	Fósforo	FeO
Ferro-gusa _{De-Si}		(kg)	%	%	%	%	-
Ferro-gusa _{De-P}		-	%	%	%	%	-
Resposta:							
Material		Massa					
Ferro-gusa _{De-P}		(kg)					

4.4 – Análise química do ferro-gusa e escória

Durante o processo de fabricação do ferro-gusa, amostras são retiradas para conferir a composição química do ferro-gusa e da escória com o objetivo de garantir a qualidade e avaliar a estabilidade do processo.

As amostras de ferro-gusa são retiradas utilizando amostradores do tipo imersão para metal líquido e analisada por espectrometria de emissão óptica e gasometria por infravermelho. Os equipamentos utilizados serão:

- Máquina de corte com disco vertical;
- Furadeira fixa;
- Equipamento *Transmab* – 350;
- Equipamento ARL – 4460;
- Equipamento LECO, modelo CS44 e HF-400.

As amostras de escória são retiradas via concha de aço carbono para amostragem manual e analisadas por espectrometria por fluorescência de raios-X. Os equipamentos utilizados serão:

- Aparelho HERZOG, modelo D-49086;
- Equipamento ARL – 72000S.

4.5 – Coleta e análise dos dados

Os dados industriais foram coletados da base de dados da Aperam South America.

Para as análises estatísticas, correlações e desenvolvimento do balanço de massa foi utilizado Office Excel.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento dos balanços de massa e os principais resultados obtidos serão apresentados neste capítulo.

5.1 – Desenvolvimento do balanço de massa do alto-forno

O balanço de massa do alto-forno tem como objetivo prever a massa de ferro-gusa e a massa de escória a ser produzido em função dos materiais carregados no topo do alto-forno. O balanço de massa do ferro e o balanço de massa da sílica são as referências para a realização dos cálculos. A figura 5.1 apresenta o balanço de massa do ferro e da sílica de forma esquemática.

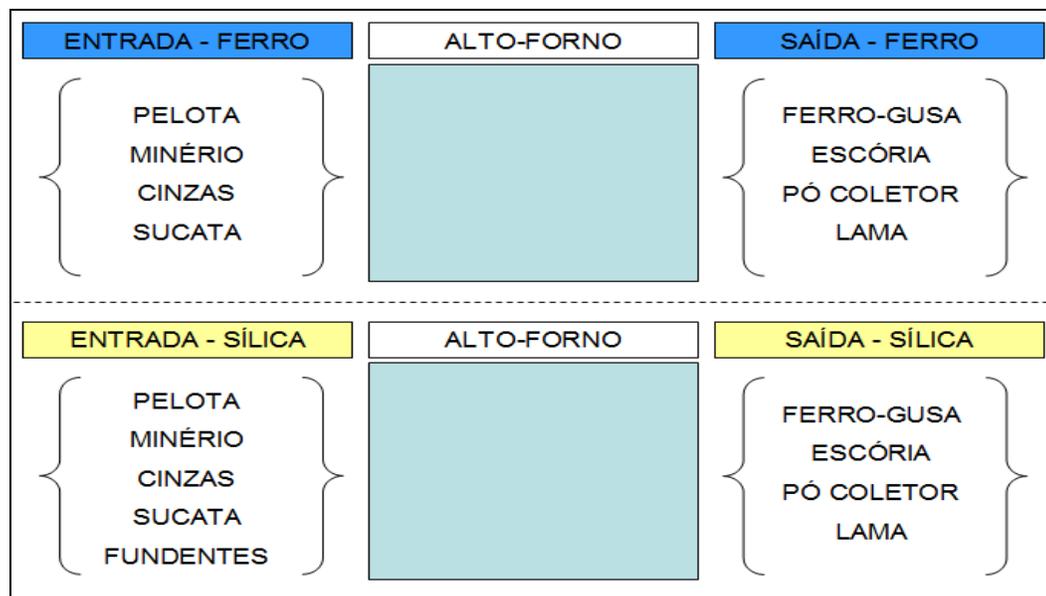


Figura 5. 1 - Balanço de massa do ferro e da sílica de forma esquemática.

A massa de ferro da entrada ($M_{Fe_{entrada}}$) é o somatório de todas as entradas de ferro da carga seca, ou seja, a umidade deve ser subtraída do valor da carga. A equação (5.1) apresenta o cálculo para a massa de ferro total.

$$MFe_{entrada} = \sum_{i=1}^n Material_i * \%Úmidade_i * \%Ferro_i \quad (5.1)$$

A massa de ferro da saída é definida conforme a equação (5.2).

$$MFe_{saída} = MFe_{pocoletor} + MFe_{lama} + MFe_{escória} + MFe_{gusa} \quad (5.2)$$

Aplicando o conceito do balanço de massa, onde a massa de entrada é igual a massa de saída, a massa de ferro no gusa é definida pela equação (5.3).

$$MFe_{gusa} = MFe_{entrada} - MFe_{pocoletor} - MFe_{lama} - MFe_{escória} \quad (5.3)$$

Conhecido o valor da massa de ferro no ferro-gusa (MFe_{gusa}) o cálculo da massa de ferro-gusa ($MGusa$) é dependente do percentual de ferro presente no ferro-gusa. A equação (5.4) apresenta o cálculo da massa de ferro-gusa.

$$MGusa = \frac{MFe_{gusa} * 100}{\%Ferro_{gusa}} \quad (5.4)$$

De forma análoga ao balanço de ferro, a massa de entrada e saída da sílica é calculada. Sendo que a massa de silício presente no ferro-gusa é o resultado da redução da sílica, portanto o silício deverá ser transformado em sílica para compor o cálculo. A equação (5.5) apresenta o cálculo da massa de sílica reduzida ($MSiO_2_{reduzido}$).

$$MSiO_{2reduzida} = (MGusa * \%Silicio_{gusa}) * \left(\frac{P.A Si}{P.A SiO_2} \right) \quad (5.5)$$

Assim, a massa de sílica na escória pode ser escrita como:

$$MSiO_{2escória} = MSiO_{2entrada} - MSiO_{2pocoletor} - MSiO_{2lama} - MSiO_{2reduzida} \quad (5.6)$$

Conhecido o valor da massa de sílica na escória ($MSiO_{2escoria}$) o cálculo da massa de escória ($MEsc$) é dependente apenas do percentual de sílica presente na escória. A equação (5.7) apresenta o cálculo da massa de escória.

$$MEsc = \frac{MSiO_{2escoria} * 100}{\%Silica_{escoria}} \quad (5.7)$$

Definido a massa de escória, o cálculo para a massa de ferro presente na escória é de acordo com a equação (5.8).

$$MFe_{escoria} = MEsc * \%FeO_{escoria} * \left(\frac{P.A Fe}{P.A FeO} \right) \quad (5.8)$$

A massa de ferro-gusa entregue a Aciaria é definido como:

$$MGusa_{aciaria} = MGusa - MGusa_{solido} - MGusa_{perdas} \quad (5.9)$$

A perda de massa de ferro-gusa durante o processo ($MGusa_{perda}$) é definida como uma constante (0,75% da produção), esse valor foi determinado com base em medições históricas. A massa de ferro-gusa sólido ($MGusa_{solido}$) é pesada após sua geração.

5.2 – Desenvolvimento do balanço de massa das etapas de refino

O balanço de massa da Aciaria tem como objetivo prever a massa de ferro-gusa a ser produzido em função da rota definida para o refino. A figura 5.2 apresenta o balanço de massa das rotas de refino do ferro-gusa de forma esquemática.

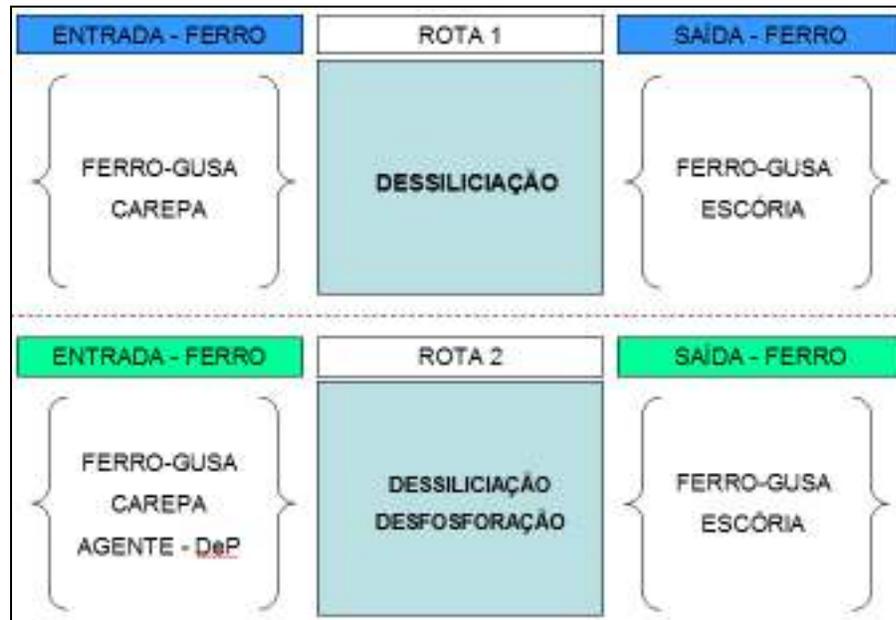


Figura 5. 2 - Balanço de massa do ferro de forma esquemática.

A massa de ferro-gusa encaminhada para Aciaria ($MG_{usa_{aciaria}}$) compõe a entrada de ferro do processo de refino no PTG. A seguir, a descrição do banco de massa do ferro-gusa em função da rota de produção.

Balanço de massa da rota 1

A rota 1 contempla a oxidação do silício dissolvido no ferro-gusa pelo agente dessiliciante (carepa de laminação). Nesta etapa ocorre também oxidação do manganês. A equação (5.10) apresenta a oxidação do silício e a equação (5.11) apresenta a oxidação do manganês.



Definido as reações predominantes, o balanço de massa pode ser descrito.

A massa de ferro-gusa dessiliciado ($MGusa_{DeSi}$) é o somatório de todas as entradas de ferro, contemplando as reações de oxidação do silício (Si) e do manganês (Mn). A equação (5.12) apresenta o balanço de massa do ferro-gusa De-Si.

$$MGusa_{DeSi} = (MGusa_{aciaria} * \%Fe) + MFe_{reduzido} - (MGusa_{aciaria} * 1\%) \quad (5.12)$$

Onde a massa de ferro reduzida ($MFe_{reduzida}$) representa o ferro resultante da reação do silício e manganês com o óxido de ferro presente na carepa. Às equações (5.14) e (5.15) apresentam o cálculo dos componentes da equação (5.13).

$$MFe_{reduzido} = \frac{(MSi_{oxi} * 2 * P.A Si)}{P.A Fe} + \frac{(MMn_{oxi} * P.A Mn)}{P.A Fe} \quad (5.13)$$

$$MSi_{oxi} = (MGusa_{aciaria} * \Delta Silicio_{gusa}) \quad (5.14)$$

$$MMn_{oxi} = (MGusa_{aciaria} * \Delta Manganês_{gusa}) \quad (5.15)$$

A perda de massa de ferro-gusa durante raspagem da escória é definida como uma constante (1% da $MGusa_{aciaria}$), esse valor foi determinado com base em medições históricas.

Balanço de massa da rota 2

A rota 2 contempla a oxidação do silício e do fósforo dissolvido no ferro-gusa pelo agente dessiliciante (carepa de laminação) e o agente desfosforante (agente rico em minério de ferro). Nesta etapa ocorre também oxidação do manganês e do carbono. As equações de (5.16) a (5.21) apresentam a oxidação dos principais elementos.





A primeira etapa da rota 2 é a dessiliciação do ferro-gusa pela carepa de laminação conforme a rota 1. Na segunda etapa o agente desfosforante rico em minério de ferro e cálcio é injetado no ferro-gusa reduzindo os teores de silício, manganês e fósforo. A oxidação do carbono ocorre pelo oxigênio soprado simultaneamente com a injeção do agente desfosforante.

Definido as reações predominantes, o balanço de massa pode ser descrito.

A massa de ferro total ($M\text{Fe}_{\text{gusa - DeSi}}$) é o somatório de todas as entradas de ferro, contemplando as reações de oxidação do silício (Si) e do manganês (Mn). A equação (5.22) apresenta o balanço de massa do ferro-gusa DeSi.

$$MGusa_{DeP} = (MGusa_{DeSi} * \%Fe_{gusaDeSi}) + MFe_{reduzida} - (MGusa_{DeSi} * 1) \quad (5.22)$$

Onde a massa de ferro reduzida ($M\text{Fe}_{\text{reduzida}}$) representa o ferro resultante da reação do silício, manganês e fósforo com o óxido de ferro presente no minério de ferro. As equações (5.24) a (5.26) apresentam o cálculo dos componentes da equação (5.23).

$$MFe_{red} = \frac{(MSi_{oxi} * 4 * P.A Si)}{3 * P.A Fe} + \frac{(MMn_{oxi} * 2 * P.A Mn)}{3 * P.A Fe} + \frac{(MP_{oxi} * 5 * P.A P)}{3 * P.A Fe} \quad (5.23)$$

Assim como observado na carga metálica, os fundentes e as cinzas apresentaram valores baixos de desvio padrão, permitindo a utilização das médias para cálculo do balanço de massa.

5.3.2 – Relação da produção calculada pelo balanço de massa e os dados industriais

Os resultados obtidos no balanço de massa dos altos-fornos foram comparados aos valores extraídos do banco de dados do SIP. A tabela V.5 apresenta os dados obtidos do SIP e o resultado do balanço de massa.

Tabela V. 5 - Dados do SIP e o resultado do balanço de massa.

MÊS	PRODUÇÃO SIP (ton.)			PRODUÇÃO BALANÇO DE MASSA (ton.)		
	ALTO-FORNO 1	ALTO-FORNO 2	TOTAL	ALTO-FORNO 1	ALTO-FORNO 2	TOTAL
1	16.927,40	32.735,30	49.662,70	16.239,32	32.383,70	48.623,02
2	15.352,20	20.992,10	36.344,30	14.976,78	20.886,86	35.863,64
3	15.689,00	29.348,60	45.037,60	15.372,99	29.239,79	44.612,78
4	17.583,90	24.678,00	42.261,90	17.299,58	24.506,35	41.805,93
5	16.773,90	25.598,80	42.372,70	16.445,51	25.544,25	41.989,76
6	15.538,00	24.547,30	40.085,30	15.377,50	24.584,28	39.961,78
7	15.081,80	23.458,80	38.540,60	15.098,12	23.531,45	38.629,57
8	14.132,30	32.173,20	46.305,50	14.116,28	32.219,92	46.336,20
9	14.405,20	25.344,30	39.749,50	14.066,73	25.147,74	39.214,47
10	16.193,60	30.806,70	47.000,30	16.099,62	30.821,58	46.921,20
11	11.877,10	30.254,70	42.131,80	11.879,47	30.443,37	42.322,84
12	-	30.334,90	30.334,90	-	30.501,25	30.501,25

Comparando os dados, é possível observar variações positivas e negativas nos dois altos-fornos. As variações são explicadas em função da composição química da carga, onde o SIP utiliza as médias das análises diária, e para o cálculo do balanço foi utilizada a média anual.

A o cálculo da produção no SIP é realizado pela massa de ferro por carga, onde a massa de ferro é definida pela entrada de ferro no Alto-Forno. O numero de cargas carregadas é informado pelo sistema de carregamento do Alto-Forno, este número pode variar em função do ritmo de produção do Alto-Forno.

A figura 5.1 representa em gráfico as produções do alto-forno 1, e a figura 5.2 representa em gráficos as produções do alto-forno 2.

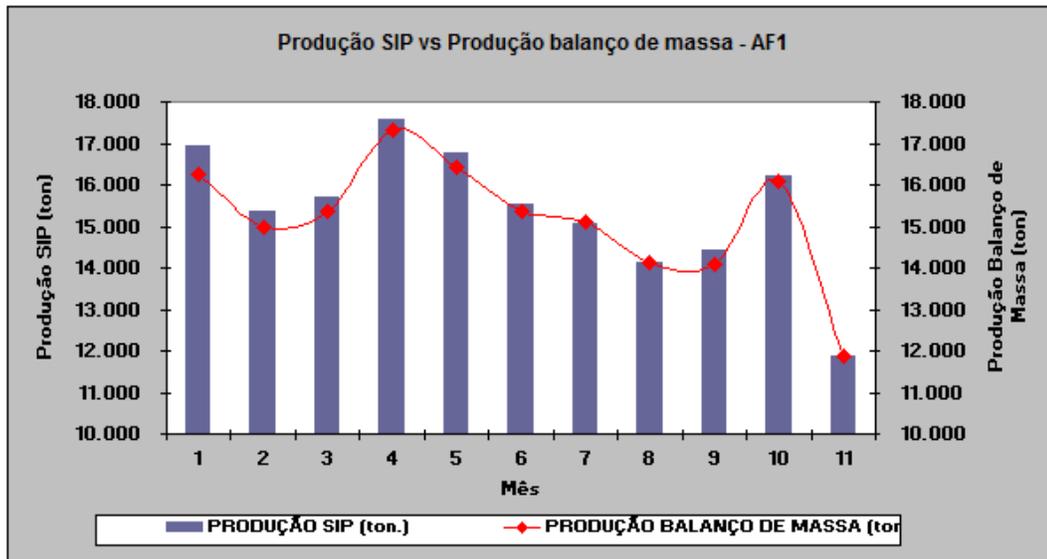


Figura 5. 3 - Gráfico as produções do alto-forno 1.

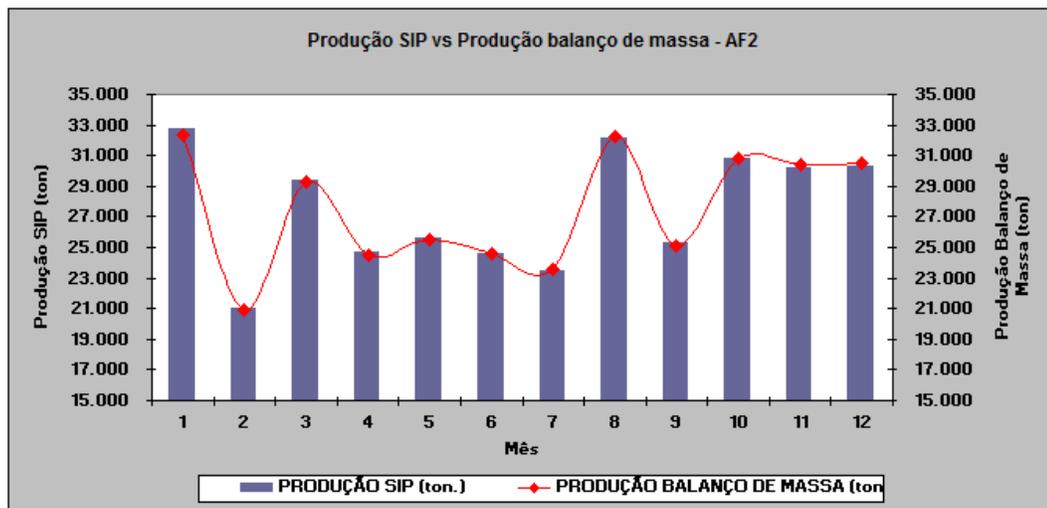


Figura 5. 4 - Gráfico as produções do alto-forno 2.

O rendimento do ferro-gusa contempla o ferro-gusa entregue na Aciaria, ferro-gusa sólido e as perdas de processo. A tabela V.6 apresenta os resultados do rendimento com base na produção calculada pelo balanço de massa e pela produção calculada pelo SIPa.

Tabela V. 6 – Rendimento do ferro-gusa com base na produção calculada pelo balanço de massa e pelo SIP.

MÊS	PRODUÇÃO BALANÇO DE MASSA (ton)	GUSA SÓLIDO (ton)		PERDA DE PROCESSO (ton)		FERRO-GUSA ACIARIA (ton)	Rendimento (%)
		SUCATEADO	LINGOTADO	ALTO-FORNO 1	ALTO-FORNO 2		
1	48.623,02	1.543,28	3.240,00	121,79	242,88	43.475,07	0,894
2	35.803,64	805,42	1.800,00	112,33	188,85	33.128,24	0,924
3	44.612,78	1.147,08	2.740,00	115,30	218,30	40.301,11	0,905
4	41.805,80	1.647,70	1.380,00	128,75	183,80	38.484,08	0,921
5	41.889,78	1.502,26	1.620,00	123,34	191,58	38.552,58	0,918
6	38.861,78	1.811,52	880,00	115,33	184,38	37.080,05	0,928
7	38.628,57	2.310,61	2.880,00	113,24	178,40	33.138,24	0,858
8	46.338,20	792,40	2.480,00	105,87	241,85	42.706,28	0,922
9	30.214,47	830,91	1.800,00	105,50	188,61	28.180,45	0,920
10	46.921,20	1.165,20	2.170,00	120,75	231,16	43.234,10	0,921
11	42.322,84	1.139,63	2.080,00	80,10	228,33	38.785,79	0,916
12	30.501,25	886,70	3.185,00	-	228,70	25.490,79	0,809
MEDIA							0,882%
DESVIO PADRAO							2,30%

MÊS	PRODUÇÃO SIP TOTAL (ton)	GUSA SÓLIDO (ton)		PERDA DE PROCESSO (ton)		FERRO-GUSA ACIARIA (ton)	Rendimento (%)
		SUCATEADO	LINGOTADO	ALTO-FORNO 1	ALTO-FORNO 2		
1	40.662,70	1.543,28	3.240,00	126,06	245,51	43.600,80	0,862
2	36.344,30	805,42	1.800,00	115,14	187,44	31.628,40	0,870
3	45.037,60	1.147,08	2.740,00	117,67	220,11	40.775,20	0,905
4	42.281,80	1.647,70	1.380,00	131,88	185,08	38.051,30	0,900
5	42.372,70	1.502,26	1.620,00	125,80	191,90	37.118,10	0,876
6	40.085,30	1.811,52	880,00	118,54	184,10	38.212,40	0,953
7	38.540,60	2.310,61	2.880,00	113,11	175,94	32.885,10	0,854
8	46.305,50	792,40	2.480,00	105,89	241,30	42.108,80	0,909
9	30.748,50	830,91	1.800,00	108,04	190,88	28.614,30	0,896
10	47.000,30	1.165,20	2.170,00	121,45	231,05	42.388,80	0,902
11	42.131,80	1.139,63	2.080,00	80,08	226,91	39.222,40	0,931
12	30.334,90	886,70	3.185,00	-	227,51	25.704,00	0,847
MEDIA							0,893%
DESVIO PADRAO							3,05%

O comportamento do rendimento pelo balanço de massa e pelo SIP indica uma perda de aproximadamente 10% na massa de ferro-gusa produzida. Essa perda de rendimento está vinculada a geração de ferro-gusa sólido e erros de apontamento.

Os erros de apontamento são os resultados das massas de ferro-gusa lingotadas e sucateadas, essas massa são medidas após seu beneficiamento. Apesar do ferro-gusa recebido na Aciaria ser pesado via pontes rolantes, erros de pesagens e lançamentos de dados no sistema SIP podem ocorrer (dados lançados manualmente pelo operador).

O gráfico da figura 5.5 permite avaliar o impacto das perdas no rendimento do ferro-gusa.

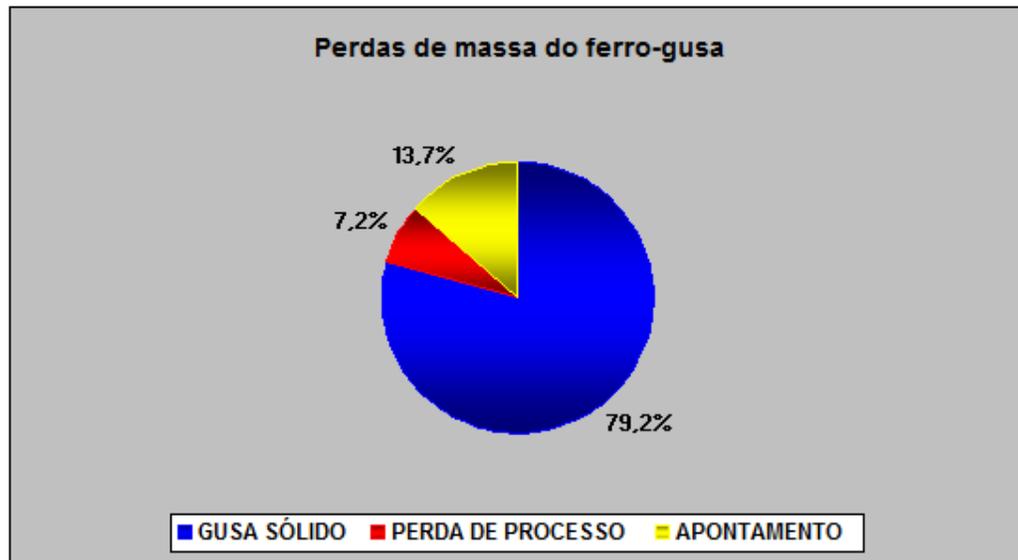


Figura 5. 5 - Gráfico das perdas de massa do ferro-gusa.

Como apresentado na figura 5.5 o baixo rendimento do ferro-gusa em 2015 tem a geração de ferro-gusa sólido como a principal causa (79,2%).

O ferro-gusa é solidificado via lingotamento ou baias de sucateamento. Os principais motivos para solidificar o ferro-gusa são:

- composição química fora da faixa especificada;
- paradas de Aciaria (emergência ou preventivas);
- mix de aço produzido na Aciaria (baixo consumo de ferro-gusa).

Quantificar o ferro-gusa solidificado por motivo, não é possível devido à falta de informação no histórico.

5.4 – Resultados do balanço de massa das etapas de refino

5.4.1 – Premissa para elaboração do balanço de massa

Com o objetivo de validar o balanço de massa desenvolvido para cálculo da produção na estação PTG em função da rota de refino, comparou-se os dados industriais com a produção calculada pelo balanço de massa.

Como premissa para elaboração do balanço de massa, foi definida as seguintes condições:

- Composição química média do ferro-gusa no período;
- 75% de FeO na carepa de laminação;
- 45% de minério de ferro na composição do agente desfosforante, minério de ferro com 58% de ferro;
- Perda de 1% da massa total de ferro-gusa durante raspagem da escória.

5.4.2 – Balanço de massa da Dessiliciação (Rota 1)

A etapa de dessiliciação tem como objetivo reduzir o teor de silício dissolvido no ferro-gusa. Na Aperam South America o processo é realizado no momento em que o ferro-gusa é vertido do carro-torpedo para panela. A carepa de laminação rica em óxido de ferro (FeO) é adicionada via calha de adição após o início do basculamento do carro-torpedo. A figura 5.4 apresenta a tela de controle operacional da etapa de dessiliciação.

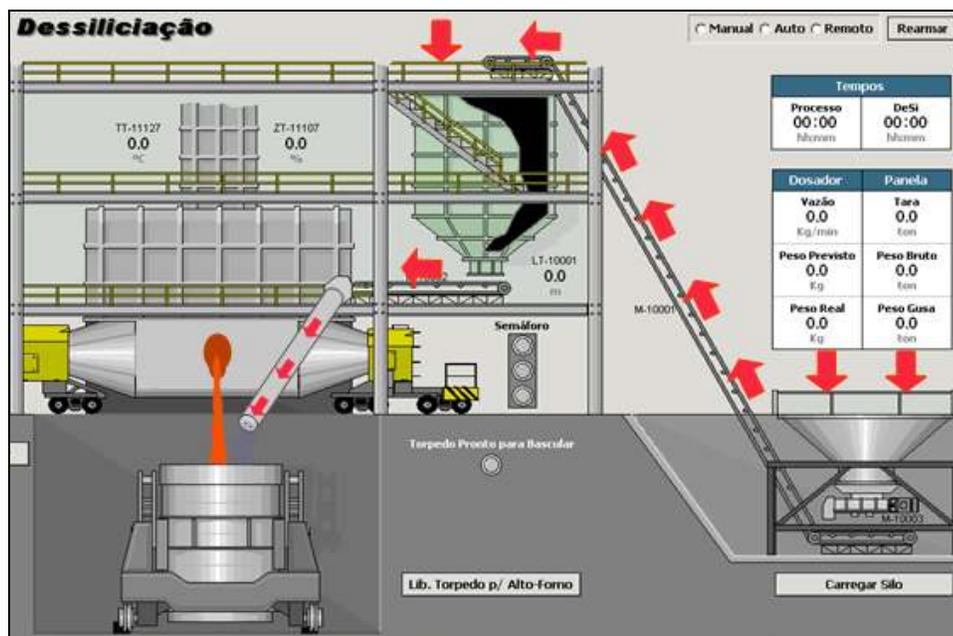


Figura 5. 6 - Tela de controle operacional da etapa de dessiliciação.

O balanço de massa da Rota 01 é válido para os aços elétricos e aços carbono. A tabela V.7 apresenta o rendimento do ferro-gusa com base no balanço de massa da rota 1 e o rendimento do ferro-gusa com base nos dados industriais (dados do SIP).

Tabela V. 7 – Dados do rendimento do ferro-gusa da rota 1.

Balanco de Massa		
FERRO-GUSA ACIARIA (ton.)	FERRO-GUSA De-Si (ton.)	Rendimento (%)
32.572	31.737,75	97,4%
22.623	22.073,53	97,6%
30.412	29.876,66	98,2%
29.886	29.298,85	98,0%
30.005	29.309,59	97,7%
29.970	29.261,50	97,6%
26.697	26.592,24	99,6%
29.419	29.032,64	98,7%
28.489	27.896,45	97,9%
34.726	33.999,93	97,9%
30.819	30.233,23	98,1%
12.250	12.050,67	98,4%
	MEDIA	98,10%
	DESvio PADRÃO	0,59%
Dados industriais		
FERRO-GUSA ACIARIA (ton.)	FERRO-GUSA De-Si (ton.)	Rendimento (%)
32.815,70	31.416,14	95,74%
21.598,58	20.728,85	95,97%
30.701,70	29.324,72	95,51%
29.549,94	28.052,30	94,93%
28.888,68	27.316,06	94,56%
30.876,10	29.909,04	96,87%
26.499,84	24.516,42	92,52%
29.008,13	28.463,89	98,12%
28.043,19	27.335,34	97,48%
34.054,73	32.985,54	96,86%
31.165,71	30.268,67	97,12%
11.885,99	11.485,60	96,63%
	MEDIA	96,03%
	DESvio PADRÃO	1,52%

De acordo com a tabela V.7, o rendimento médio do ferro-gusa após a etapa de dessiliciação apresentou uma perda de 1,9% para o cálculo via balanço de massa e 3,97% para os dados industriais. Essa diferença está nas considerações feitas em relação à perda de massa durante a raspagem da escória e as perdas por projeções (perda de massa de ferro-gusa e escória durante a dessiliciação).

O teor de silício dissolvido no ferro-gusa aumenta o volume de escória, gerada durante o processo e as projeções. A figura 5.7 apresenta o gráfico de correlação do rendimento real e o teor de silício dissolvido no ferro-gusa.

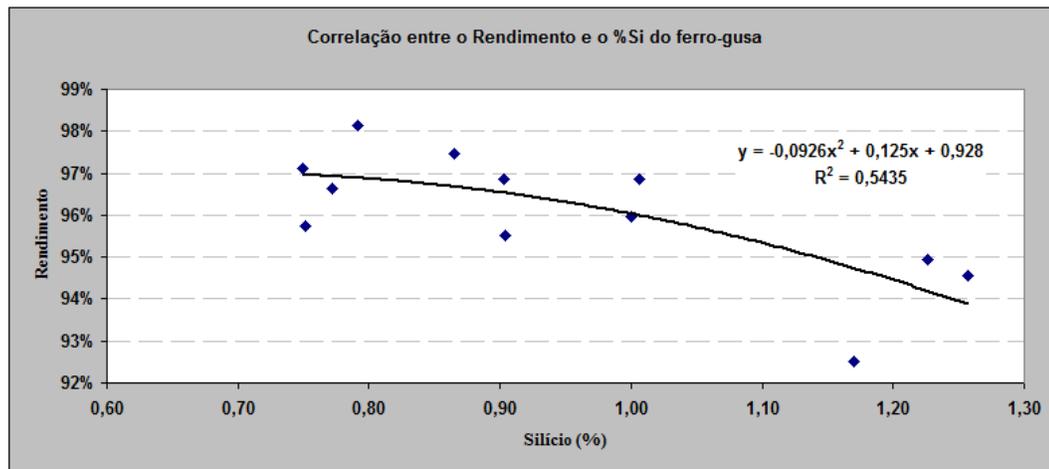


Figura 5. 7 - Gráfico de correlação do rendimento real e o teor de silício dissolvido no ferro-gusa.

A correlação apresenta um coeficiente de $R=0,74$ ($R^2=0,54$). A curva polinomial demonstra que o rendimento tende a estabilizar em valores próximos a 98%, indicando um limite técnico próximo do valor apresentado pelo balanço de massa. A correlação é satisfatória em função da raspagem e o controle das projeções serem realizadas manualmente pelos operadores.

5.4.3 – Influência do teor de silício dissolvido no ferro-gusa no processo desfosforação

De acordo com (KOROS, 1998) o silício funciona como bloqueio para oxidação do fósforo por apresentar maior afinidade pelo oxigênio. Conforme apresentado na figura 5.8, a desfosforação começa quando o teor de silício atinge valores abaixo de 0,15%. A sequência do processo de desfosforação está descrita abaixo:

1. Dessiliciação na virada do carro torpedo (DeSi);
2. Dessiliciação na estação de tratamento com injeção de nitrogênio (DeSi_1);
3. Dessiliciação com agente desfosforante (DeSi_2).
4. Desfosforação DeP.

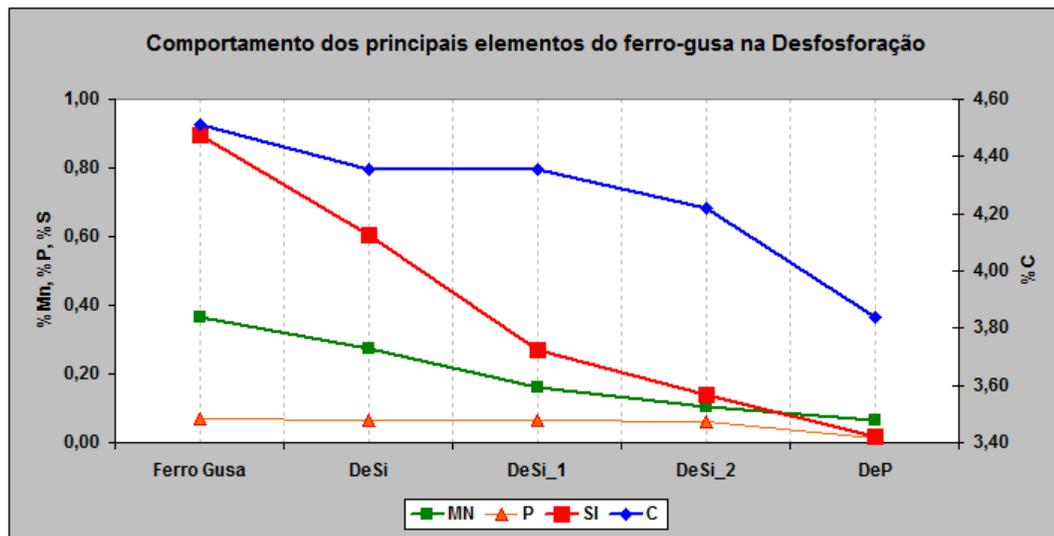


Figura 5. 8 - Comportamento do carbono, silício, manganês e fósforo durante a etapa de desfosforação.

Conforme o gráfico da figura 5.8 o manganês apresenta uma queda acentuada até a segunda etapa de dessiliciação (DeSi_1), a estabilização do teor de manganês nas etapas seguintes se dá em função da sua baixa atividade no ferro-gusa. O percentual de carbono no ferro-gusa é reduzido após a terceira etapa de dessiliciação (DeSi_2), onde começa a etapa de desfosforação com injeção do agente desfosforante e o sopro de oxigênio, aumentando a atividade do oxigênio no banho metálico.

A correlação apresentada no gráfico da figura 5.9 apresenta um coeficiente $R=0,85$ ($R^2=0,72$), demonstrando uma forte influência do percentual de silício dissolvido inicialmente no ferro-gusa sobre o percentual de silício dissolvido antes da etapa de desfosforação.

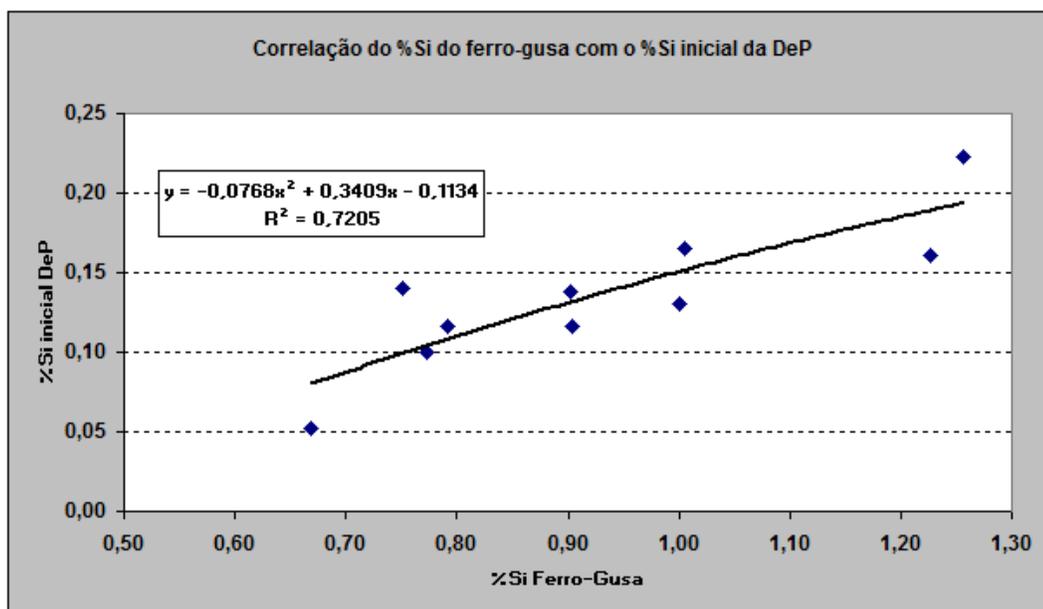


Figura 5. 9 - Correlação entre o teor de silício do ferro-gusa e o teor de silício após a etapa de (DeSi – 1).

O aumento do teor de silício dissolvido no ferro-gusa antes da etapa de desfosforação implica no aumento do consumo de agente desfosforante e no tempo de refino, conforme apresentado na tabela V.10.

Tabela V. 8 - Impacto do %Si no consumo de agente DeP e no tempo de refino do ferro-gusa.

%Si Ferro-Gusa	%Si_DeP	Consumo Agente DeP (kg/t)	Tempo Tratamento DeP (min)
0,40	0,011	28,88	51,77
0,50	0,038	29,05	57,46
0,60	0,063	29,88	63,53
0,70	0,088	31,24	69,99
0,80	0,110	33,03	76,82
0,90	0,131	35,16	84,04
1,00	0,151	37,51	91,64
1,10	0,169	40,01	99,63
1,20	0,185	42,57	107,99

5.4.4 – Balanço de massa da Desfosforação (Rota 2)

O balanço de massa da etapa de desfosforação é válido para os aços inoxidáveis.

A primeira etapa da desfosforação é a redução do percentual de silício dissolvido no ferro-gusa, ou seja, o ferro-gusa obrigatoriamente passa pela rota 1. Após a etapa de dessiliciação, o ferro-gusa é encaminhado ao processo de desfosforação.

A desfosforação tem como objetivo reduzir o teor de fósforo dissolvido no ferro-gusa para valores específicos para cada tipo de aço a ser produzido. Na Aperam South America o processo é realizado nas estações de tratamento, onde o agente desfosforante rico em minério de ferro é injetado por um lança submersa próximo ao fundo da panela e o oxigênio é soprado na superfície do banho metálico. A figura 5.10 apresenta desenho esquemático de uma estação de desfosforação.

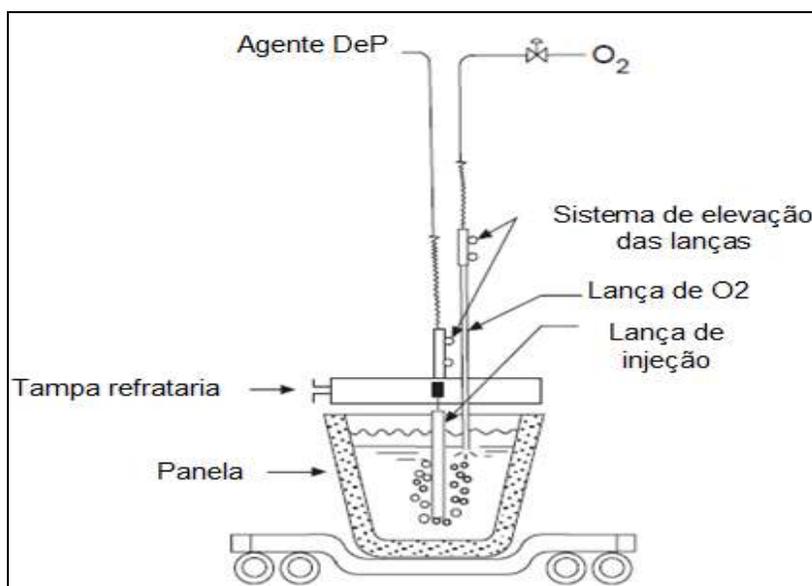


Figura 5. 10 - Desenho esquemático de uma estação de desfosforação. (KOROS, 1998)

A tabela V.9 apresenta o rendimento do ferro-gusa com base no balanço de massa da rota 2 e o rendimento do ferro-gusa com base nos dados industriais (dados do SIP).

Tabela V. 9 - Dados reais e teóricos de entrada e saída do balanço de massa da rota 2.

Balanço de Massa			
FERRO-GUSA ACIARIA (ton.)	FERRO-GUSA De-Si (ton.)	FERRO-GUSA De-P (ton.)	Rendimento (%)
10.903,25	10.494,61	10.211,51	93,7%
10.506,47	10.177,49	9.920,93	94,4%
9.978,61	9.697,24	9.421,37	94,4%
8.598,19	8.418,20	8.185,14	95,2%
8.547,45	8.328,48	8.108,16	94,9%
7.120,92	6.895,54	6.722,17	94,4%
6.442,73	6.282,21	6.108,35	94,8%
13.287,25	12.851,60	12.490,99	94,0%
7.691,46	7.403,29	7.210,42	93,7%
8.508,46	8.223,20	8.012,30	94,2%
7.967,01	7.685,28	7.476,69	93,8%
14.240,98	13.782,65	13.407,75	94,1%
		MEDIA	94,31%
		DESVIO PADRÃO	0,47%
Dados industriais			
FERRO-GUSA ACIARIA (ton.)	FERRO-GUSA De-P (ton.)		Rendimento (%)
10.984,90	10.175,00		92,6%
10.030,82	9.266,50		92,4%
10.073,50	9.266,70		92,0%
8.501,36	7.849,00		92,3%
8.229,42	7.782,83		94,6%
7.536,30	7.413,60		98,4%
6.395,26	5.782,50		90,4%
13.101,67	12.774,70		97,5%
7.571,11	7.534,00		99,5%
8.344,07	8.073,90		96,8%
8.056,69	7.755,60		96,3%
13.818,01	12.549,05		90,8%
		MEDIA	94,5%
		DESVIO PADRÃO	3,1%

De acordo com a tabela V.9, o rendimento médio do ferro-gusa após a etapa de desfosforação apresentou uma perda de 5,7% para o cálculo via balanço de massa e 5,5% para os industriais. O valor de 3,1% para o desvio padrão, assim como altos valores de rendimento são reflexos das considerações feitas em relação à perda de massa durante a raspagem de escória e as perdas por projeções (perda de massa de ferro-gusa e escória durante a dessiliciação / desfosforação).

5.5 – Integração dos balanças de massa do ferro-gusa

O balanço de massa integrado agrupa os balanços realizados para os altos-fornos e para Aciaria, permitindo correlacionar à produção dos altos-fornos, a qualidade do ferro-gusa e as etapas de refino.

O balanço integrado do ferro-gusa permite prever:

- massa de ferro-gusa disponível para o PTG;
- massa de ferro-gusa a ser solidificado;
- capacidade de processamento do PTG;
- tempo de processamento da Rota 2;
- consumo de agente desfosforante;

A figura 5.11 apresenta a tela de entrada dos dados do balanço integrado, onde a produção dos altos-fornos é considerada como a produção calculada diária. Os valores do percentual de silício são as médias diárias, e a porcentagem de cada rota depende da programação da produção dos convertedores.

ENTRADA DE DADOS			
Produção diária AF1	<input type="text"/>	tonelada	
			Produção diária AF2
			<input type="text"/>
			tonelada
Silício AF1	<input type="text"/>	%	
			Silício AF2
			<input type="text"/>
			%
Ferro-Gusa ROTA 1	<input type="text"/>	%	
			Ferro-Gusa ROTA 2
			<input type="text"/>
			%

Figura 5. 11 - Tela de entrada dos dados do balanço integrado.

Os resultados de resposta do balanço integrado são apresentados na figura 5.12. Os valores apresentados como saída são resultados das correlações e dos cálculos de rendimentos apresentados nos balanços anteriores.

SAÍDA DE DADOS	
Ferro-Gusa ROTA 1 0 tonelada	Ferro-Gusa ROTA 2 0 tonelada
Silício Ponderado #DIV/0! %	Silício - DeSi #DIV/0! %
Ferro-Gusa Total 0 tonelada	Silício - DeP #DIV/0! %
Capacidade PTG #DIV/0! tonelada	Consumo Agente DeP #DIV/0! kg/t
Ferro-gusa Sólido #DIV/0! tonelada	Tempo Tratamento #DIV/0! minutos

Figura 5. 12 - Tela de saída dos dados do balanço integrado.

Conhecendo os valores das massas de ferro-gusa disponíveis para carregamento dos convertedores, o consumo de ferro-gusa passa a ser dependente do tipo de aço a ser produzido e as suas limitações técnicas. A tabela V.10 apresenta os limites técnicos para produção diária nos convertedores por tipo de aço.

Tabela V. 10 - Limites técnicos para produção diária por tipo de aço.

AÇO	CONVERTEDOR	CORRIDAS (nº)	ROTA	MASSA (ton.)	
				FEA - PTG	PTG - PTG
CARBONO	MRP-L	16	1	-	80
GO	MRP-L	20	1	-	82
GNO	MRP-L	20	1	-	78
4XX	AOD-L	16	2	35	70
3XX	AOD-L	16	2	35	70
FEA-PTG	- 35 toneladas da carga do convertedor é pré-metal				
PTG-PTG	- 100% da carga do convertedor é ferro-gusa				

Os limites técnicos foram baseados em dados históricos de produção.

5.5.1 – Validação do balanço de massa integrado do ferro-gusa

O período escolhido para validação do balanço integrado teve como critério:

- Variação nos percentuais das rotas;
- Solidificação programada de ferro-gusa;
- Todo ferro-gusa solidificado por motivo de capacidade da Aciaria

O período escolhido foi do dia 05 ao dia 10 de fevereiro 2016, onde o programa *SPEED* (programa de planejamento integrado da produção, desenvolvido pela OMPARTNERS) programou solidificar parte do ferro-gusa produzido. A tabela V.11 apresenta os dados reais como entrada do balanço integrado e a tabela V.12 apresenta os dados utilizados pelo *SPEED*.

O programa *SPEED* é responsável pelo planejamento da produção da Aperam South America ao longo do mês, o programa é integrado com o SIP e permite o acompanhamento da produção *on-line*.

Tabela V. 11 - Dados de entrada do balanço integrado.

ENTRADA DE DADOS						
Dia / Mês	PRODUÇÃO (ton.)		SILICIO (%)		Rota (%)	
	Alto-Forno 1	Alto-Forno 2	Alto-Forno 1	Alto-Forno 2	Rota 1	Rota 2
05/fev	503,00	1.301,00	0,49	0,38	69%	31%
06/fev	507,00	1.210,00	0,54	0,2	71%	29%
07/fev	494,00	1.140,00	0,52	0,62	17%	83%
08/fev	537,00	1.227,00	0,44	0,4	38%	62%
09/fev	480,00	1.213,00	0,42	0,48	96%	4%
10/fev	475,00	1.222,00	0,63	0,73	100%	0%

Tabela V. 12 - Simulação do *SPEED*.

ENTRADA DE DADOS - SPEED						
Dia / Mês	PRODUÇÃO (ton.)		SILICIO (%)		Rota (%)	
	Alto-Forno 1	Alto-Forno 2	Alto-Forno 1	Alto-Forno 2	Rota 1	Rota 2
05/fev	496,00	1.150,00	0,45	0,50	69%	31%
06/fev	496,00	1.150,00	0,45	0,50	71%	29%
07/fev	496,00	1.150,00	0,45	0,50	17%	83%
08/fev	496,00	1.150,00	0,45	0,50	38%	62%
09/fev	496,00	1.150,00	0,45	0,50	96%	4%
10/fev	496,00	1.150,00	0,45	0,50	100%	0%

Como o *SPEED* é um programa utilizado para prever a produção ao longo do tempo, os valores de entrada são estimados.

O resultado da massa de ferro-gusa solidificado previsto pelo balanço de massa integrado está apresentado na tabela V.13, junto à massa de ferro-gusa solidificado previsto no *SPEED* e a massa real.

Tabela V. 13 - Resultados da massa de ferro-gusa solidificado.

Dia / Mês	Ferro-Gusa Sólido MODELO	Ferro-Gusa Sólido SPEED	Ferro-Gusa Sólido REAL
05/fev	573,00	408,00	209,00
06/fev	412,00	272,00	383,00
07/fev	316,00	111,00	536,00
08/fev	202,00	-	287,00
09/fev	149,00	-	96,00
10/fev	160,00	-	-
	1.514,00	791,00	1.511,00

De acordo com os dados apresentados na tabela V.13, observa-se uma grande variação na massa de ferro-gusa solidificada por dia. Essa variação ocorre em função do descompasso entre a produção do ferro-gusa nos altos-fornos, o recebimento na Aciaria e seu encaminhamento para as lingotadeira ou baias de sucateamento.

Avaliando o período, o total de ferro-gusa solidificado previsto pelo balanço de massa apresentou valor próximo ao real, permitindo utilizar o balanço de massa para prever a massa de ferro-gusa solidificado com certa precisão.

6 – CONCLUSÃO

O balanço de massa integrado permitiu calcular com certa precisão a massa de ferro-gusa solidificado em função da produção dos Altos-Fornos, da qualidade do ferro-gusa (percentual de silício), da rota de refino e do tipo de aço reduzido na Aciaria.

O balanço de massa dos altos-fornos apresentou a geração do ferro-gusa sólido como o principal impacto no rendimento do ferro-gusa, sendo 79,2% da perda de massa.

A qualidade do ferro-gusa é fundamental para a estabilidade dos processos de refino. O percentual de silício dissolvido no ferro-gusa apresentou uma correlação satisfatória com o rendimento do ferro-gusa na etapa de dessiliciação.

Os efeitos do percentual de silício dissolvido no ferro-gusa podem ser observados também na etapa de desfosforação, onde o tempo de processo e o consumo do agente desfosforante são dependes do valor inicial do silício.

O conhecimento prévio da massa de ferro-gusa a ser solidificada é fundamental para o planejamento da produção dos altos-fornos e dos aços na Aciaria. Alterações estratégicas no planejamento podem evitar ou reduzir a geração de ferro-gusa sólido, permitindo o seu maior aproveitamento na Aciaria, conseqüentemente melhorando o rendimento.

7 – SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Estudar a possibilidade de inserir o balanço de massa integrado do ferro-gusa na plataforma do *SPEED*;
2. Estudar as perdas de processo nos altos-fornos;
3. Estudar as perdas por apontamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÂNGELO, M. M. Construção e simulação de um algoritmo que permita prever os efeitos da injeção de diferentes materiais pulverizados pelas ventaneiras em altos-fornos. Ouro Preto: Escola de Engenharia UFOP, 2013. 98p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Materiais).

ANK, J. G. Curso de Formação de Aciaristas; Módulo: Pré Tratamento do Gusa. Documento interno: ArcelorMittal Inox Brasil, 2009. p33.

ARAÚJO, L. A. Manual de Siderurgia. 2.ed. Brasil: Arte e Ciência, 2005. 470p.

ATHAYDE JÚNIOR, J. D. G. de. *Otimização da Injeção de Gás Inerte no Convertedor MRPL*; Belo Horizonte: Escola de engenharia UFMG, 2005. 95p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

BARÃO, C. D. *Comportamento do manganês durante o sopro de oxigênio em convertedor*. Ouro Preto: Escola de Engenharia UFOP, 2007. 149p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Materiais).

BISWAS, A. K. *Principles of Blast Furnace Ironmaking. Theory and Practice*. Australia: Brisbane. University of Queensland, 1981.

CASTRO, L. F. de. SAMPAIO, R. S., TAVARES, R. P. *Termodinâmica metalúrgica*. Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica. 1985; 480p.

CASTRO, L.F.A. de; MORELATO, A. P.; TAVARES, R. P. *Injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras do alto-forno*. Universidade Federal do estado de Minas Gerais (Fundação Cristiano Ottoni), Belo Horizonte, Outubro, 1997.

DEO, B.; BOOM, R. *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*. 1.ed. Hertfordshire: Prentice Hall International (UK) Limited, 1993.

DOGAN, N. BROOKS, A. G., RHAMDHANI, A. M. *Kinetics of Flux Dissolution in Oxygen Steelmaking*. In: ISIJ INTERNATIONAL, 10, vol.49, 2009, Japan. p1474 – 1482.

FELIX FILHO, D. S. *Avaliação do efeito do volume e da vazão de gás na Recuperação de Metais Oxidados no Processo de Produção do Aço Inoxidável em Convertedores AOD*; Belo Horizonte: Escola de engenharia UFMG, 2009. 98p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalurgica).

GANDRA, B. F. *Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinhado alto-forno*; Belo Horizonte: Escola de engenharia UFMG, 2006. 95p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalurgica).

GEERDES, M. TOXOPEUS, H. VLIET, C. V. der. *Modern Blast Furnance Ironmaking an introduction*. 2.ed. London, 2009.

MARIN, H. *Modelamento Matemático do Refino do Aço Inoxidável em Conversores AOD-L*; Belo Horizonte: Escola de engenharia UFMG, 2006. 132p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalurgica).

MILLER, T.W. JIMENEZ, J. SHARAN, A. GOLDSTEIN, D.A. *Oxygen Steelmaking Processes*. In: FRUEHAN, R. J. *The Making, Shaping and Treating of Steel*; Steelmaking and Refining Volume. 11^a. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998. cap.9, p. 475-524.

PEACEY, J. G. DAVENPORT W. G. *The Iron Blast Furnance – Theory and Practice*. 1.ed. Toronto: Pergamon Press, 1979. 231p.

KOROS, P. J. Steel Pre-Treatment of Hot Metal. In: FRUEHAN, R. J. *The Making, Shaping and Treating of Steel*; Steelmaking and Refining Volume. 11^a. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998. cap.7, p. 413-429.

ROSENQUIST, T. *Principles of Extractive Metallurgy*, 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1986. p500.

TORKDONGAN, E. T. *Fundamentals of Steelmaking*, 1.ed. Cambridge: The Institute of Materials, 1996. 331p.