

PADRONIZAÇÃO DO TEOR DE SI FINAL DO GUSA NO PTG*

*Christiano de Paula Boaventura¹
Alessandro Martins Duarte²
Gabriela Patrícia Gomes³
Hélio Braz Loss⁴
Janeir Ribeiro Dutra⁵*

Resumo

Para produção de aço em uma usina integrada o gusa líquido é parte predominante na composição da carga metálica, porém, levando em consideração a sua composição típica e para otimização do processo é necessário que haja um tratamento precedente ao carregamento do convertedor. Teores elevados de silício carregados em convertedores para produção de aço carbono e elétricos provocam um maior consumo de fundentes para neutralizar a sílica gerada durante o processo e maior instabilidade, por outro lado teores muito baixo não fornecem um balanço térmico favorável para utilização de sucata. Diante disso é necessário trabalhar com uma faixa de silício que atenda o mínimo necessário para que se tenha um balanço térmico favorável. Este projeto teve por objetivo modelar a dessiliciação através da adição de um agente dessiliciante e sopro de oxigênio na panela, trabalhando com um teor de silício final entre 0,20% a 0,50 %. A dessiliciação do gusa é realizada em 2 etapas, sendo a primeira quando o gusa é transferido do carro torpedo para a panela e a segunda etapa com sopro de oxigênio. O projeto conseguiu reduzir em 44% a quantidade de corridas fora da especificação, reduzindo dessa forma o consumo de fundentes no convertedor.

Palavras-chave: Dessiliciação; Pré tratamento; Gusa; Remoção do silício.

STANDARDIZATION OF FINAL SI CONTENT OF PIG IRON IN PTG

Abstract

For steel production in an integrated mill liquid cast iron is predominant in the composition of the metallic load, however, taking into consideration its typical composition and for optimization of the process it is necessary that there is a treatment preceding the loading of the converter. High silicon content loaded in converters for carbon and electric steel production causes higher flux consumption to neutralize the silica generated during the process and greater instability, while very low contents do not provide a favorable heat balance for the use of scrap. Therefore, it is necessary to work with a strip of silicon that meets the minimum necessary for a favorable thermal balance. The aim of this project was to model the desiliconization through the addition of a desilicizer and blowing agent in the pan, working with a final silicon content of 0.20% to 0.50%. The desiccation of the pig iron is carried out in 2 stages, the first one when the pig iron is transferred from the torpedo car to the pot and the second stage with oxygen blow. The project managed to reduce the number of races outside the specification by 44%, thereby reducing the flux consumption in the converter.

Keywords: Desiliconization; Pretreatment; Pig iron; Silicon oxide.

- ¹ Engenharia Metalúrgica, Bel, Engenheiro de Processo, Aciaria, Aperam South America, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.
- ² Administração, Bel, Gerente da Elaboração, Aciaria, Aperam South America, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.
- ³ Engenharia Metalúrgica, Bel, Engenheiro de Processo, Aciaria, Aperam South America, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.
- ⁴ Engenharia Química, Bela, Estagiária, Aciaria, Aperam South America, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.
- ⁵ Engenharia Mecânica, MSc, Gerente Controle de processo, Aciaria, Aperam South America, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.
- ⁶ Engenharia de Materiais, MSc, Metalurgista Aços Elétricos, Aciaria, Aperam South America, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O ferro gusa é obtido através da redução de minérios de ferro em altos fornos onde sua produção é uma atividade extremamente importante para a fabricação do aço em uma siderúrgica, correspondendo a grande parte do custo de produção. Segundo Aguiar (2016), na Aperam South América o ferro gusa produzido via altos-fornos representa 85% da matéria-prima utilizada pela aciaria para produção dos aços carbono e elétricos, e 35% para produção dos aços inoxidáveis (sucata fundida nos FEA's representa 65% da carga).

Gusa é uma liga ferro-carbono de alto teor de carbono com teores variáveis de silício, manganês, fósforo e enxofre, conforme é mostrado na tabela 1. Para atendimento ao fluxo de produção, o mesmo deve atender as especificações em função do tipo de aço a ser produzido nos convertedores.

Tabela 1. Composição química típica do ferro-gusa.

Gusa	
Elemento	%
Carbono	3,0 a 4,4%
Silício	0,5 a 4%
Manganês	0,5 a 2,5%
Fósforo	0,05 a 2,0%
Enxofre	max 0,20%

Para atendimento ao fluxo de produção, o gusa deve atender as especificações em função do tipo de aço a ser produzido nos convertedores. A APERAM utiliza como redutor o carvão vegetal, o que faz com que o teor de silício torne-se crítico quanto ao acerto da composição química (ALVARENGA, 2014). Para os aços carbonos e elétricos, as principais variáveis a serem controladas anteriores ao carregamento são o carbono e o silício, uma vez que, de acordo com Aguiar (2016) e Araújo (2005), altos teores de silício (> 0,6%) provocam instabilidade no processo e maior consumo de fundentes e baixos teores (< 0,15%), provocam aporte térmico.

Na APERAM, a dessiliciação (DeSi) é feita no pré-tratamento de gusa (PTG), onde também é realizada a desfosforação (DeP). No PTG, o silício do ferro gusa é oxidado pela adição de agentes dessilicantes e/ou sopro de oxigênio (AGUIAR, 2016). Existem duas estações equipadas com lanças, onde uma penetra no banho e adiciona material pulverizado quando necessário, e promove a injeção de gases a fim de homogeneizar o banho. Já a outra, injeta oxigênio, sem obter contato com o gusa líquido, a fim de aquecer e realizar acerto de composição química. A adição do agente dessilicante é feita durante a transferência do gusa do carro torpedo para a panela, conforme mostra a figura 1.

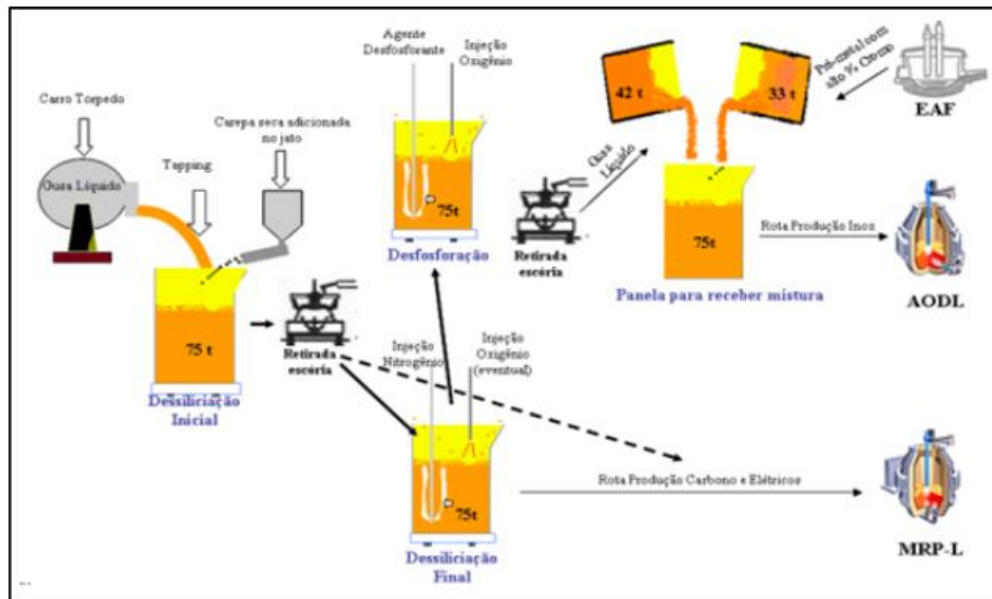


Figura 1. Etapas do refino no PTG

Diante da necessidade da adequação do processo para uma dessiliciação eficiente, o conhecimento e análise das etapas de operações de refino aliado a um modelo adequado, representam um passo fundamental para realizar o controle de todas as variáveis do processo. Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um modelo matemático para calcular a quantidade de material dessiliciante a ser adicionado na virada de gusa e, o volume de oxigênio a ser soprado na panela na etapa da dessiliciação da estação de pré tratamento da aciaria. Além disso, visa-se a melhoria substancial da qualidade, redução de custos e otimização do tempo de processo.

2 DESENVOLVIMENTO

Para a realização do projeto foi utilizado a ferramenta DEMAIC da metodologia Six Sigma onde, inicialmente, foi calculado a capacidade do processo para atendimento faixa de 0,2% a 0,50% de teor de silício final no processo PTG.

Para a padronização do processo, é necessário conhecer todas as variáveis que possuem correlação com o teor final de silício no PTG. Com isso, realizou-se um estudo do processo e levantou-se 21 variáveis, identificadas na figura 2.

MATRIZ CAUSA & EFEITO										
10 - 9 - 8: Forte Correlação			7 - 6 - 5 - 4: Média Correlação			3 - 2 - 1: Baixa Correlação			0: Não há correlação	
Índice de Importância										
X's do Processo	Teor final de Si							TOTAL	Esforço de Eliminação da Variável	Impacto
X ₁	Quantidade de agente dessiliciante	10						100	Alto	Alto
X ₂	Vazão de oxigênio	7						70	Baixo	Baixo
X ₃	Volume de oxigênio	9						90	Baixo	Alto
X ₄	Turno de processamento	5						50	Baixo	Baixo
X ₅	Dia da semana de processamento	5						50	Baixo	Baixo
X ₆	Tempo de homogeneização	6						60	Alto	Baixo
X ₇	Teor de Si inicial do gusa	10						100	Alto	Alto
X ₈	Teor de Mn inicial do gusa	8						80	Alto	Alto
X ₉	Teor de C inicial do gusa	8						80	Alto	Alto
X ₁₀	Teor de SiO ₂ no agente dessiliciante	7						70	Alto	Baixo
X ₁₁	Teor de CaO no agente dessiliciante	7						70	Alto	Baixo
X ₁₂	Teor de FeT no agente dessiliciante	8						80	Alto	Alto
X ₁₃	% de finos de minério no agente dessiliciante	7						70	Baixo	Baixo
X ₁₄	% de carepa no agente dessiliciante	7						70	Baixo	Baixo
X ₁₅	Temperatura do gusa no canal de vazamento	8						80	Alto	Alto
X ₁₆	Momento de adição de agente dessiliciante	9						90	Baixo	Alto
X ₁₇	Tempo de processamento das corridas	9						90	Baixo	Alto
X ₁₈	Variação da composição química do gusa	7						70	Baixo	Baixo
X ₁₉	Adição de agente dessiliciante sem resultado da CQ	8						80	Baixo	Alto
X ₂₀	Vazão de adição de agente dessiliciante	7						70	Alto	Baixo
X ₂₁	Temperatura final do processo	8						80	Alto	Alto

Figura 2. Matriz de Causa e Efeito

Feito isso, realizou-se a matriz de esforço e impacto, a fim de identificar as prioridades das ações a serem tomadas, conforme mostra a figura 3.

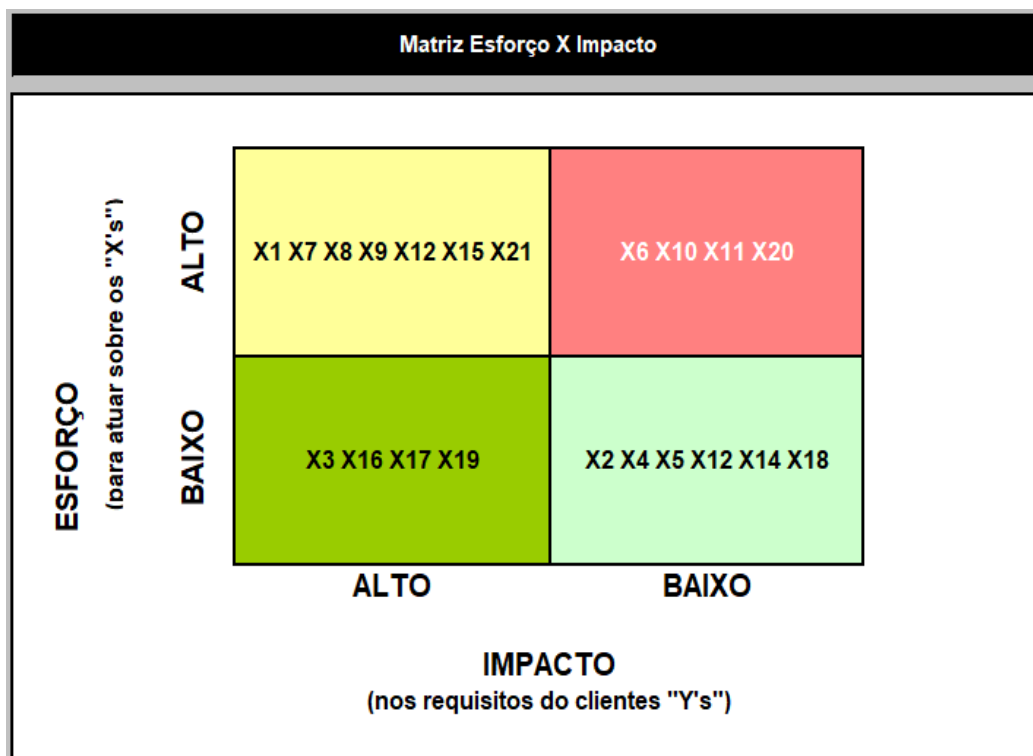


Figura 3. Matriz de esforço e Impacto

Através da matriz de dispersão, verificou-se qual o impacto das variáveis quando analisadas simultaneamente no teor de dessiliciação (conforme mostra a figura 4), para assim priorizar o trabalho onde o resultado obtido fosse satisfatório.

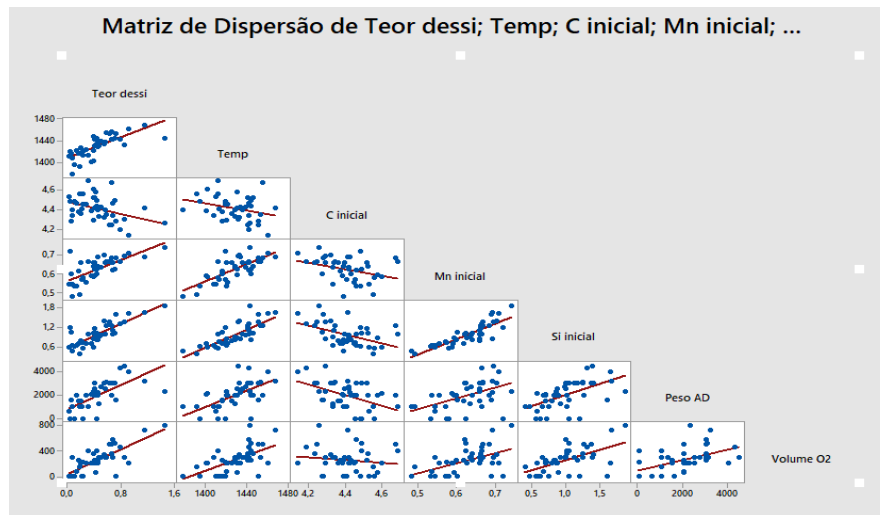


Figura 4. Matriz de dispersão

Após realizar uma regressão dos melhores subconjuntos, observou-se que as variáveis de maior impacto na etapa de dessiliciação foram: o teor de Si inicial, o peso de agente dessiliciante adicionado e o volume de oxigênio injetado. Diante dessas observações, o projeto foi direcionado para o modelamento da quantidade agente dessiliciante e volume de oxigênio.

2.1 Elaboração do modelo de dessiliciação

Os resíduos sólidos utilizados como fontes de oxigênio, normalmente são gerados na própria planta e são compostos basicamente pelos óxidos FeO e Fe₂O₃. Um blend é formado quando finos de minério são misturados à carepa. A tabela 2 mostra a composição química típica da carepa, finos de minério e blend, que serviram de base para a realização desse estudo.

Tabela 2. Composição química dos agentes

Elemento	Carepa (%)	Finos de Minério (%)	Blend (%)
CaO	0,45	1,04	0,52
C	1,07	0,63	0,75
SiO ₂	1,89	10,29	4,34
Fe Met	1,34	0,15	0,8
FeT	70,83	58,62	67,76
S	0,018	0,01	0,018
P	0,012	0,04	0,018
MgO	0,05	0,35	0,184
Al ₂ O ₃	0,07	1,17	0,378

Além da composição química, granulometria e umidade são características que devem ser observadas na seleção do agente dessiliciante. A Granulometria propicia maior interface de reação quando compreendida entre 0,5 e 10 mm, melhorando a eficiência do processo e, ao mesmo tempo, evita que partículas menores sejam sugadas, durante a adição, pelo sistema de desempoeiramento. A umidade deve apresentar percentual menor que 1,0% para reduzir os riscos de projeções de metal para fora da panela durante o carregamento. A tabela 3 mostra os resultados para granulometria e umidade para a carepa, os finos de minério e o blend.

Tabela 3. Granulometria e umidade dos agentes DeSi

Insumo	Análise Granulométrica		umidade
	<0,50 mm	>= 0,50 mm	
Carepa	55,9%	44,1%	0,1%
Finos de Minério	26,3%	73,7%	0,4%
Blend	41,10%	58,90%	0,22%

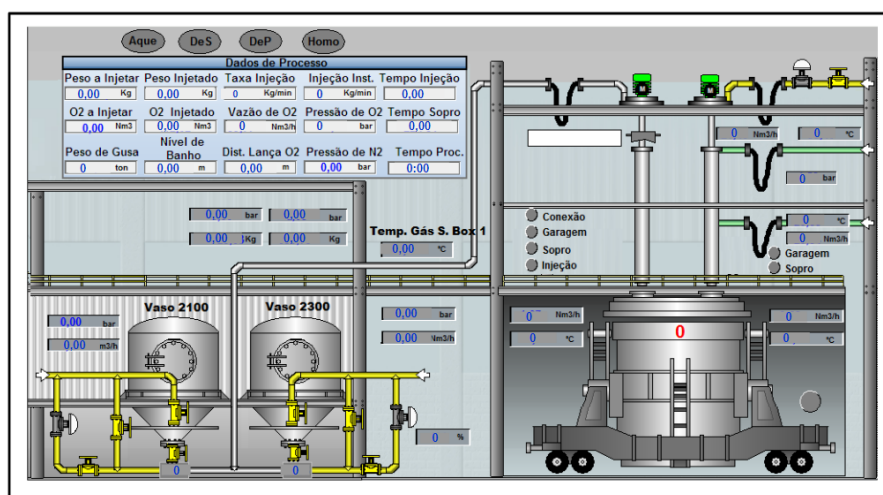
O agente dessiliciante utilizado para construção do modelo foi o Blend de Finos de minério e carepa. O material é estocado em baias de matéria prima antes do carregamento no silo.

2.1.1 Lança de oxigênio

O sopro de oxigênio ocorre através de uma lança de topo na fase de homogeneização e, em casos em que o metal apresente baixa temperatura e/ou o teor de silício dissolvido fora de faixa, durante a homogeneização realizada pela injeção de nitrogênio.

Para execução dos testes não foi soprado oxigênio durante a homogeneização, a fim de evitar interferências nessa fase e não mascarar os resultados de rendimento do agente dessiliciante.

A lança de oxigênio possui corpo em aço ASTM A-406, 04 furos, bico em cobre fundido, condutibilidade térmica de 80 IACS, diâmetro de 170mm e comprimento de 6000mm. A vazão da lança de O2 pode chegar a 1800 m³/h. A figura 5 mostra a tela de controle operacional da etapa de injeção de oxigênio por meio de lança.

**Figura 5.** Tela de controle operacional de injeção de oxigênio com lança

2.1.2 Base de dados

Para a construção da base de dados, acompanhou-se diversas corridas onde os seguintes parâmetros foram analisados:

- Composição química do gusa antes e depois da homogeneização;
- Adições de agente DeSi;
- Temperatura durante todo o processo;
- Tempo de homogeneização;
- Vazão da lança de injeção de nitrogênio;
- Peso do gusa;

Para os estudos realizados em cada um desses parâmetros, foram observados tendências, mudanças de patamares, causas especiais, variabilidade, etc. Na preparação dos dados, foi priorizado a fase de dessiliciação na virada do gusa, não sendo contempladas as demais etapas de refino do gusa.

Para desenvolvimento do modelo, foi necessário calcular as entradas e saídas de oxigênio através do balanço de massa do sistema. O objetivo do balanço de massa é prever a quantidade de material dessiliciante a ser adicionado em função do teor de silício objetivado após a homogeneização, com base no peso da carga e composição química inicial.

O banco de dados utilizado para construção do balanço de massa foi elaborado a partir de informações diárias de consumos do PTG, e informações da qualidade dos insumos adicionados e do gusa recebido.

Foram avaliados os principais parâmetros de processo, tais como qualidade e composição química de gusa, da escória e do agente, reações envolvidas etc., e comparados com os resultados obtidos com a análise dos indicadores. Simultaneamente a cada análise, foram realizadas análises teóricas, baseadas em estudos metalúrgicos. A figura 6 caracteriza de forma esquemática o balanço de massa para refino do ferro gusa.

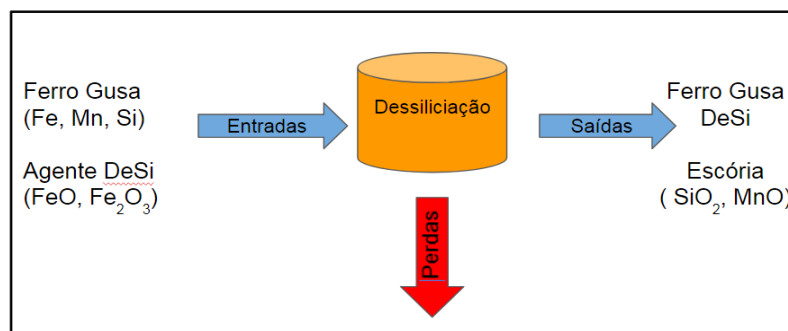


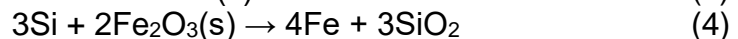
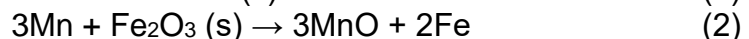
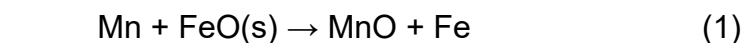
Figura 6. Desenho esquemático do balanço de massa

Como premissas para elaboração do balanço de massa foram definidas as seguintes condições:

- Faixa de temperatura do gusa entre 1340°C a 1440°C no canal de vazamento do alto forno;

- Painelas e torpedos com temperatura de encharque do refratário acima de 600°C;
- Adição de carepa efetuada durante basculamento de gusa do torpedo na panela;
- Tempo de homogeneização maior que 7 minutos na panela com lança de injeção de nitrogênio com vazão de 200 m³/h;
- % de FeO e Fe₂O₃ que reage com Mn e Si é determinado em razão da participação desses compostos no agente de dessiliciação;
- Oxidação de Mn é calculada através de uma equação encontrada pelo cálculo de regressão linear.

Foi contemplada a oxidação de manganês e silício dissolvido no ferro-gusa pelo agente dessiliciante (blend). As reações abaixo apresentam as principais reações de oxidação do silício e manganês com adição de agente DeSi.



Após definido as reações predominantes, o balanço de massa pode ser descrito. O número de mols de oxigênio da entrada é fornecido pelo FeO e pelo Fe₂O₃ do agente dessiliciação, enquanto o número de mols de oxigênio da saída é fornecido pelo SiO₂ e MnO, sendo que para cada 1 mol de Mn teremos 1 mol de oxigênio e, para 1 mol de Si, teremos 2 mols de oxigênio.

O rendimento do agente dessiliciante inicialmente foi calculado com 100%, uma vez que não era conhecido o real rendimento. Após o teste de 20 corridas, encontrou-se um rendimento médio de 70%.

2.2 Resultados do modelo

O cálculo de regressão linear da oxidação do Mn utilizado como premissa para cálculo do balanço de massa, está representado pelo gráfico da figura 10. O valor de R² próximo de 1 indica alta correlação, ou seja, a equação encontrada para oxidação do Mn é eficiente.

Com o objetivo de validar o balanço de massa desenvolvido para o cálculo da adição de material dessiliciante, em função da composição química esperada, comparou-se o peso calculado pelo modelo com os dados industriais.

Observou-se que 91,7% dos resultados dos testes, a amplitude do delta entre silício objetivado e o real foi de -0,10 a 0,10, apresentando apenas dois valores acima (0,12 e 0,13).

Os valores acima estão relacionados a uma baixa homogeneização durante a adição de agente dessiliciante, na virada do gusa, além de uma possível variação de resultado de análise química do gusa no torpedo, uma vez que é retirada apenas uma amostra durante o vazamento da corrida no alto forno que

irá representar o resultado deste torpedo recebido. Os teores de Si objetivado e real calculado pelo modelo são apresentados no gráfico da figura 7.

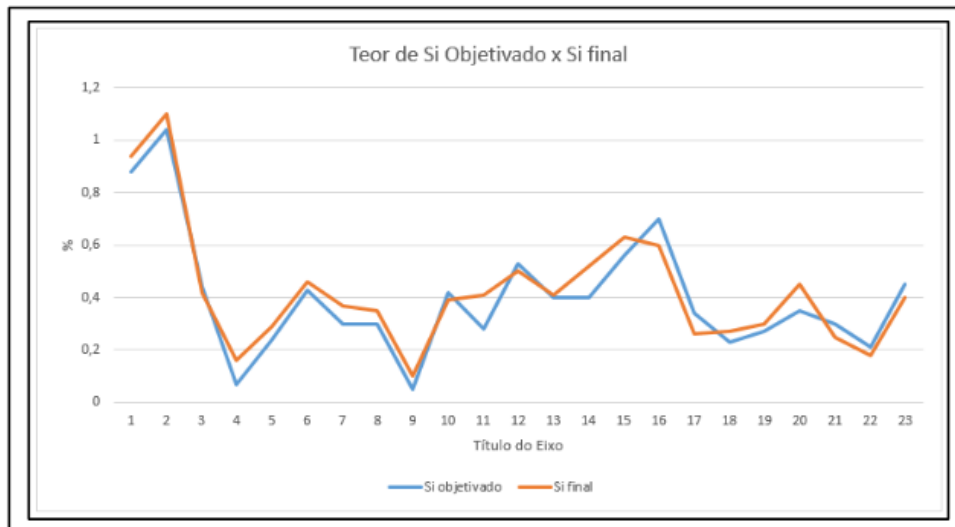


Figura 7. Teor de Si objetivado x Si final

Para utilização do modelo, o operador responsável deve indicar nos campos apropriados: o peso da carga, os valores de Si do gusa (inicial), temperatura e Si objetivado. Obtendo como resposta a quantidade de agente dessiliciante em quilogramas. O layout do modelo elaborado no Excel é apresentado na figura 8.

Cálculo do peso de Agente Dessiliciante e oxigênio após a virada

	Peso((Kg)	Teor de Si do gusa	Temperatura do gusa no canal
Carga 1	80000	0,73	1430
Carga 2			
Carga 3			
Carga Total	80000	0,73	1430
Objetivo Si final calculado modelo			0,40
Objetivo real do Si calculado			0,40
Peso de Agente dessiliciante a ser adicionado (Kg)			1477
Volume de oxigênio com vazão de 1500 NM3/H			300

Figura 8. Modelo elaborado no Excel

2.2.1 Evolução do atendimento a faixa de silício para os convertedores de 0,20% a 0,50 %

Após padronização do processo o índice atendimento a faixa de silício aumentou. A figura 9 apresenta a evolução do atendimento após a implantação do projeto a partir de abril de 2019, com um aumento de mais de 50% em relação ao histórico.

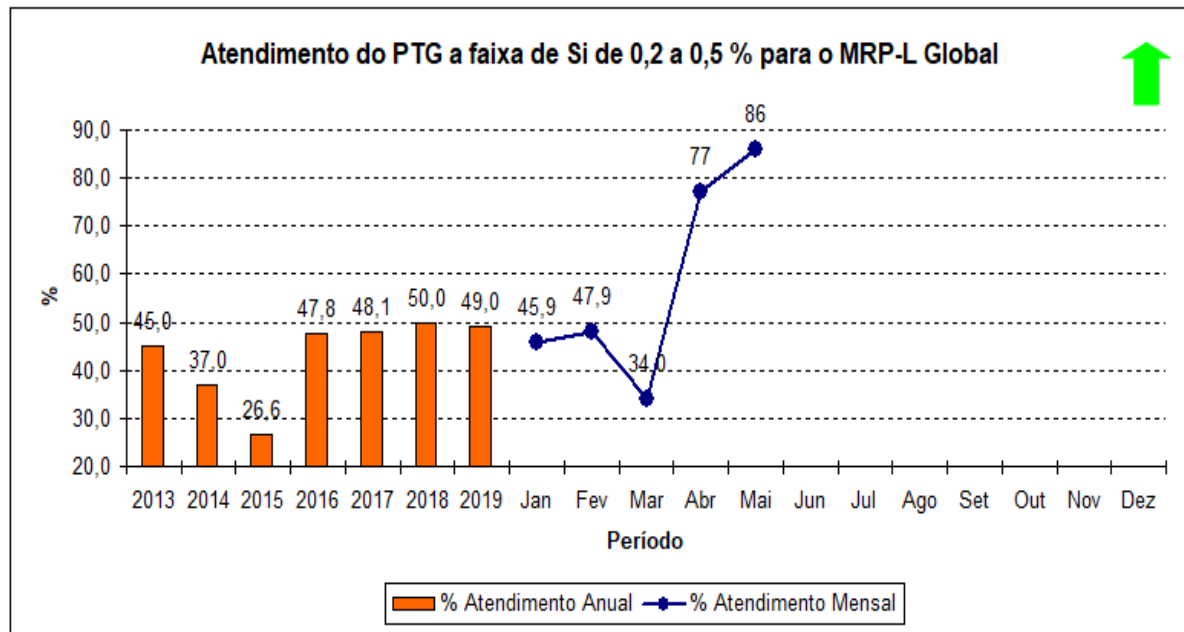


Figura 9. Redução do tempo de forno ligado médio

2.2.2 Comparação da capacidade antes e depois do projeto

Realizando uma comparação com o primeiro trimestre de 2019 e o período após a implantação do projeto, ocorreu uma redução de 44% nas corridas carregadas fora da especificação de 0,20% a 0,50%, saindo de 57,34% para 31,99%. Além disso, a média do silício carregado abaixou de 0,51% para 0,38%, conforme mostra a figura 10.

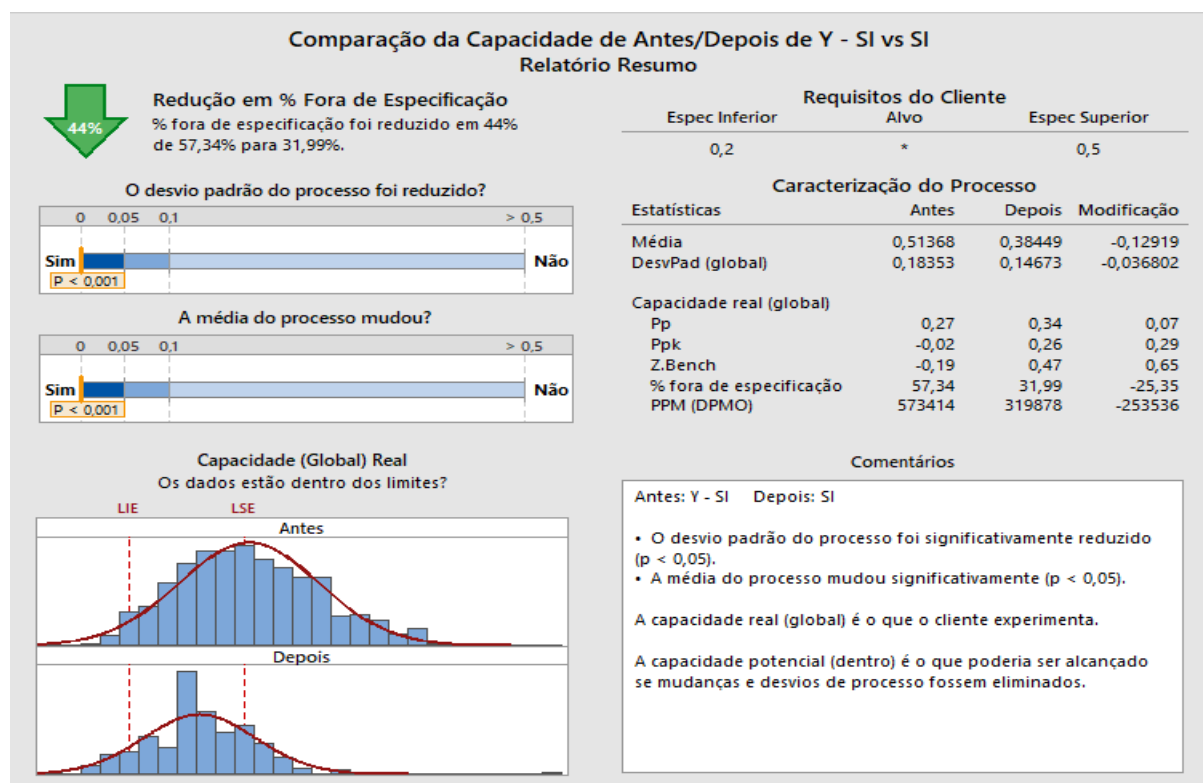


Figura 10. Comparação da capacidade antes e após o projeto

3 CONCLUSÃO

O silício é uma variável de extrema importância para a produção do aço, uma vez que em altos teores, provoca instabilidade no decorrer do processo e aumenta o consumo de fundentes. O projeto fez com que o teor de silício se estabiliza-se, tendo como consequência uma maior estabilidade durante o processo e também, uma redução de custos com a adição de fundentes no convertedor.

REFERÊNCIAS

1. Aguiar PGO. Balanço de massa integrado do ferro-gusa entre altos-fornos e Aciaria da Aperam South America. Dissertação de Mestrado. 2016. [acesso em 15 mar. 2018]. Disponível em:
<<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUBD-AEAMWP>>
2. Alvarenga VP. Desenvolvimento de fluidificante para substituição da fluorita na produção do aço SAE 1012 de alta pureza. Dissertação de Mestrado. 2014. [acesso em 12 abr. 2018]. Disponível em:
<<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3516>>.
3. Araújo LA. Manual de Siderurgia. 2.ed. Brasil: Arte e Ciência, 2005. 470p.
4. Carvalho JLR. Dados termodinâmicos para metalurgistas. Belo Horizonte: UFMG, 1977.
5. Campos VF. Tecnologia de fabricação do aço líquido: Fundamentos. 2. ed. Belo Horizonte: CNPq, 1980. 270 p. v. 1.
6. Geerdes M., Toxopeus HV. Modern Blast Furnance Iromaking an introduction. 2.ed. London, 2009.
7. VIANA, J. F. Pré-tratamento de gusa. São Paulo: ABM Brasil, 2007.