

MODELO MATEMÁTICO DE ADIÇÕES DE FERROLIGAS E DESOXIDANTE¹

*Vanessa Cavaleiro de Azevedo²
Antonio Augusto Martins³
Antonio Carlos Sant'Anna da Silva⁴
Fernando da Rocha V. Pinto⁵
Mac Donald de Souza Arruda⁶*

Resumo

A redução de custo é um objetivo permanente, perseguido em todas as fases no processo de fabricação do aço. As oportunidades desta redução são maiores nos processos produtivos que utilizam grandes quantidades e diversidade de insumos e matérias primas. Nos últimos 3 anos, vem ocorrendo uma grande flutuação nos preços do alumínio e das ferroligas, fato que demandou a otimização da carga de adições destes materiais no sentido de se diminuir o custo, com o mínimo de interferência no processo produtivo e sem perda da qualidade do aço. O objetivo que norteou o desenvolvimento deste trabalho foi a automação dos cálculos para as adições das ferroligas e desoxidantes durante o processo de vazamento e nas unidades de refino secundário convencionais com foco na flexibilidade operacional e opções de ligas existentes no mercado, objetivando o menor custo específico e a padronização das operações. O algoritmo matemático, abastecido em tempo real por eventos de processo, determina os materiais a serem adicionados, otimizando custo e adequando requisitos de qualidade ao produto final. Como resultado deste trabalho, obteve-se ao longo dos últimos 12 meses, um aumento na utilização de ferroligas de menor custo, promovendo uma redução de custo anual de R\$ 4 milhões.

Palavras-chave: Modelo matemático; Ferroligas; Aciaria; Refino secundário.

MATHEMATICAL MODEL OF ADDITIONS OF FERROALLOY AND DEOXIDIZER

Abstract

The cost reduction is a permanent target, pursued in all phases in the steel production process. The opportunities of reduction are bigger in processes that use great amounts and variety of inputs and raw materials. In the last 3 years, a great price volatility of aluminum and ferroalloys is taking place. Due to it, the addition optimization of those materials is one of the most important tool to reduce cost, with minimum interference in the process and without loss of steel quality. It was aimed the automation of addition calculation of ferroalloys and deoxidizer during the tapping and in the secondary refining with focus in operational flexibility and options of ferroalloys in the market, reaching the smallest specific cost and the standardization of operations. The mathematical algorithm, provisioned in real time by process events, determines the materials to be added, optimizes cost and meeting quality requirements of the final product. As a result of this work, it was obtained along the last 12 months, an increase in the use of ferroalloys of smaller cost, providing R\$ 4 million of annual cost reduction.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 28 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Engenheira de Desenvolvimento Sênior - CSN*

³ *Coordenador de Projetos Especiais - CSN*

⁴ *Engenheiro Especialista - CSN*

⁵ *Especialista em TI – CSN*

⁶ *Analista Sênior de TI – CSN*

1 INTRODUÇÃO

O custo das adições de alumínio e ferroligas representa cerca de 6,3% do custo total das placas de aço produzidas na CSN. Evidentemente, este valor é função da composição química dos aços.

Iniciado nos primeiros meses de 2005 e se estendendo por 2 anos e meio, dois algoritmos distintos foram desenvolvidos e implantados para a realização dos cálculos das adições. Um utilizado na etapa de vazamento e outro no refino do aço nas Estações de Borbulhamento por Argônio.

Estruturado com base nos princípios termodinâmicos, porém com forte equacionamento estatístico, através de correlações e regressões múltiplas de resultados industriais, os modelos foram integrados a outros sistemas operacionais e a computadores lógicos programáveis, tornando-se um ferramenta precisa e eficiente no controle de processo da aciaria.

2 DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS

A solubilização dos elementos no aço líquido é regida pela termodinâmica e pela cinética das reações. Considerando que os valores necessário para cada elemento respeitam as condições acima, as quantidades das ligas calculadas derivam de um balanço de massa simples.

$$Q_L = \Delta \%E * Q_{\text{aço liq}} / (\% E_M * \% \text{Rend} * 100) \quad (\text{equação 1})$$

onde:

Q_L = quantidade da ferroliga / desoxidante calculada;

$\Delta \%E$ = Aumento da concentração do elemento;

$\% E_M$ = teor do elemento na liga;

$\% \text{Rend}$ = Rendimento do elemento E_M na correção; e

$Q_{\text{aço liq}}$ = Massa total de aço líquido.

Porém a simplicidade prática dos valores atribuídos aos rendimentos esconde a complexidade das condições de equilíbrio entre os elementos dissolvido no aço líquido e dos produtos da desoxidação, como também a seqüência com que as reações ocorrem.

2.1 Cálculo das Adições para Etapa de Vazamento

O algoritmo desenvolvido para as adições, utiliza-se dos fenômenos que regem a desoxidação para estabelecer as equações matemáticas. A flexibilidade dentre as diversas práticas operacionais e a otimização do custo foram premissas básicas que nortearam a estrutura do modelo. Como práticas operacionais disponíveis, destacam-se: vazamento com desoxidação, sem desoxidação, com desoxidação parcial ou com prática de desfosforação.

No módulo de Engenharia, há opções para cada especificação química: cálculo de cada liga em função do rendimento, estabelecimento de uma quantidade fixa ou, simplesmente, a não utilização da liga. Valores estabelecidos como objetivados após o vazamento são alvos dos cálculos e em alguns casos restrições de quantidades máximas de ligas.

Em função das restrições impostas pela especificação dos aços, os elementos químicos com os quais se pode fazer o controle da desoxidação do aço são basicamente C, Mn, Si e Al.

A situação ideal seria aquela em que a reação com o oxigênio fosse realizada com elementos de liga mais baratos e que aos restantes coubesse apenas a função de elemento de liga para prover as propriedades mecânicas necessárias. Pelo princípio de fabricação das ligas FeSi e FeSiMn e pelo poder de desoxidação destes materiais, torna-se economicamente mais atrativo a desoxidação do aço líquido com estas ligas do que com Alumínio.

Mesma comparação pode ser estabelecida com as ligas de ferro manganês que possuem diferentes teores de carbono. O carbono, além de apresentar elevada relação desoxidante, vem agregado a uma liga de custo relativamente baixo, o FeMnST, quando comparado as ligas de manganês com teores de carbono mais baixos.

Especificamente para Companhia Siderúrgica Nacional, aços com teores de carbono $\leq 0,08\%$ e com limites máximo de $0,02\%$ para teor de Silício, correspondem a 65% do “portfolio” de produtos.

Para estes aços, o carbono e o silício seriam elementos “indesejáveis”, podendo exercer a função de desoxidação, ou seja, reação com o oxigênio dissolvido no aço e com os óxidos redutíveis da escória; e o alumínio e o manganês, os elementos “desejáveis”, cabendo a função de elementos de liga essenciais para a obtenção das propriedades mecânicas. A Figura 1 ilustra a situação ideal de controle.

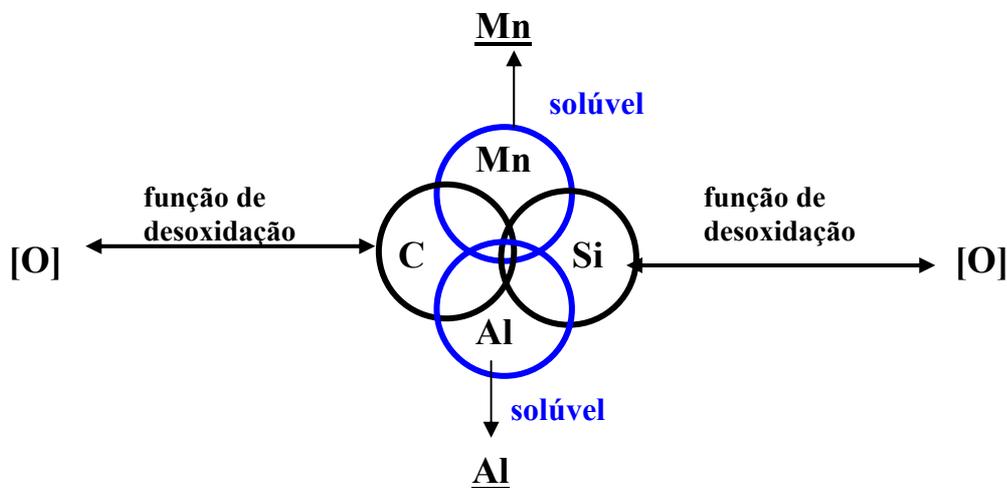


Figura 1 – Situação ideal de controle das funções das ligas adicionadas ao aço

Dentro destes conceitos, o modelo foi estruturado para as adições das ligas FeSi, FeSiMn, FeMnStd e FeMnMC.

O cálculo do peso de alumínio, nos casos a ser adicionado, é definido por meio de equações em função das outras ligas que compõe a mistura para vazamento. Cada equação é obtida por meio de regressão múltipla, sendo as variáveis, o teor de oxigênio dissolvido no aço antes do vazamento e o teor de alumínio objetivado, com coeficientes devidamente ajustados pelos resultados industriais.

Outras ligas tais como: ferro-nióbio, ferro-fósforo, ferro-cromo etc... são adicionados nas quantidades calculadas pela equação 1.

2.2 Cálculo das Adições no Refino do Aço nas Estações de Borbulhamento de Argônio

As estações de refino, com início de operação na década de 80, responde por 55% do refino do aço na CSN. Construídas com a finalidade de ajustes finos de composição química através de máquinas de injeção de arames, foi contemplada no trabalho com a automação dos cálculos de adição.

Para os ajustes finos necessários nas Estações de Borbulhamento, foi desenvolvido um algoritmo com a mesma metodologia da utilizada no vazamento. Um balanço de massa simplificado, como apresentado na equação 1, foi realizado para cada elemento cujos valores objetivados não foram atingidos na etapa de vazamento.

As correções de alumínio são calculadas em função do oxigênio dissolvido ou do teor de alumínio analisado por espectrometria ótica, conforme a metodologia ilustrada na Figura 2.

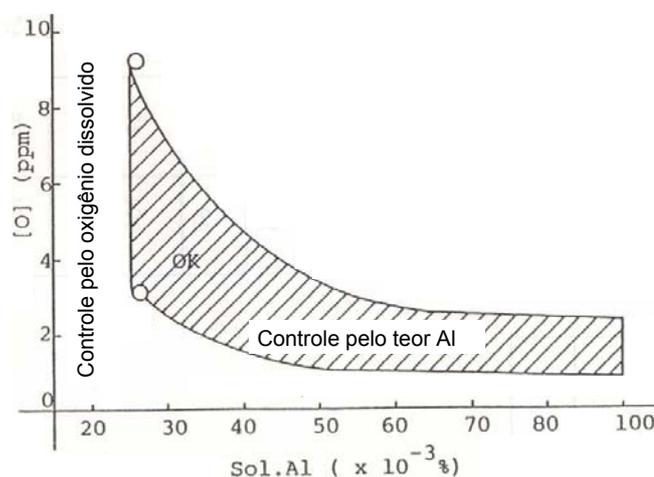


Figura 2 – Situação ideal de controle das funções das ligas adicionadas ao aço

Para valores de oxigênio dissolvido maiores que 15 ppm utiliza-se a equação 2.

$$Q_{Al} = (C_1 + C_2 \% Al_{obj} + (C_3 * (54 / 48) * \% O_2) * Q_{aço\ liq}) / \% E_{Al} \quad (\text{equação 2})$$

onde:

Q_{Al} = quantidade de Alumínio calculado;

$\% Al_{obj}$ = Alumínio Objetivado;

O_2 = Teor de oxigênio dissolvido no aço;

$Q_{aço\ liq}$ = Massa total de aço líquido;

$\% E_{Al}$ = Rendimento do Alumínio na liga; e

C_1, C_2, C_3 = Coeficientes ajustados por dados industriais.

Para valores de oxigênio dissolvido menores que 15 ppm usa a equação 3.

$$Q_{Al} = C_4 + C_5 (\% Al_{obj} - \% Al_{real}) * Q_{aço\ liq} / \% E_{Al} \quad (\text{equação 3})$$

onde:

Q_{Al} = quantidade de Alumínio calculado;

$\% Al_{obj}$ = Alumínio Objetivado;

$\% Al_{real}$ = % Alumínio obtido em amostras analisado por espectrometria ótica;

$Q_{aço\ liq}$ = Massa total de aço líquido;

$\% E_{Al}$ = Rendimento do Alumínio na liga; e

C_4 e C_5 = Coeficientes ajustados por dados industriais.

3 RESULTADOS

Para comprovar os méritos dos modelos de cálculo das adições no vazamento e nas Estações de Borbulhamentos de Argônio, cuja implantação ocorreu em Dezembro e Novembro de 2007 respectivamente, estratégias distintas foram utilizadas com o intuito de não contaminar os resultados com outros fatores inerentes ao processo produtivo.

Em função da variação na carteira de produção, o modelo de adição no vazamento estabelece para efeito comparativo, os consumos específicos das ligas FeMnStd e FeMnMC e a participação da liga de maior custo na mistura, o FeMnMC, apenas para os aços SAE1006 e 1008. O consumo das ligas e a participação do FeMnMC na mistura neste aços são apresentada na Figura 3.

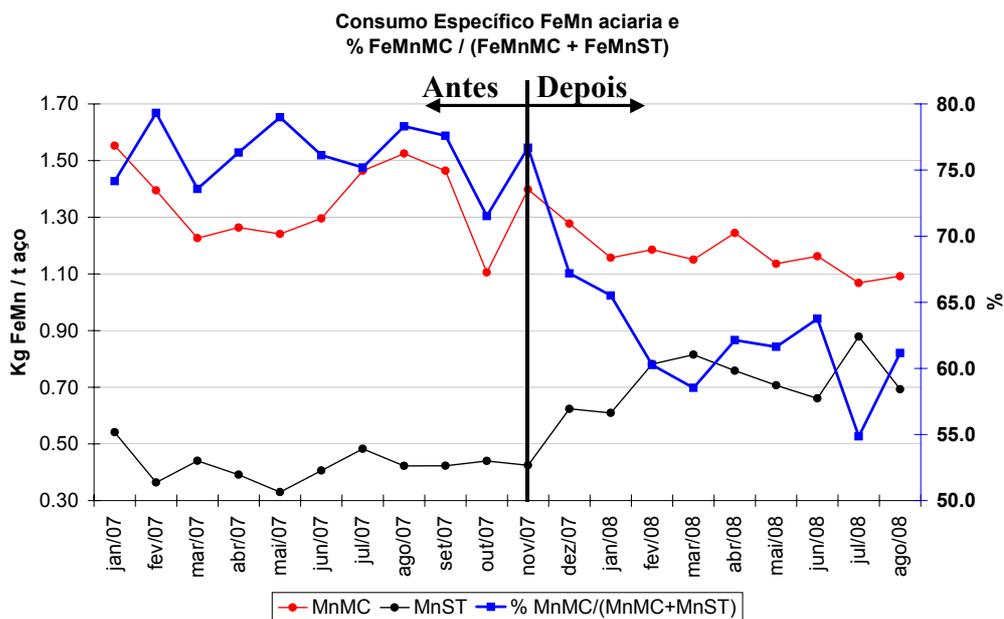


Figura 3 – Participação das ligas de FeMn nos aços SAE1006 e 1008

Já nas Estações de Borbulhamento de Argônio, construídas para pequenos ajustes na composição química, a meta a alcançar seria a redução de correções de ligas, as quais são realizados por meio de injeção de arames.

As tabelas estáticas não permitiam a otimização econômica do processo. O objetivo foi a troca de arames nas estações de borbulhamento por materiais a granéis durante o vazamento. Os resultados dos consumos específico dos arames de FeMn e Grafite, são apresentado na Figura 4. Para esta avaliação foi considerado todo aço refinado nestes equipamento.

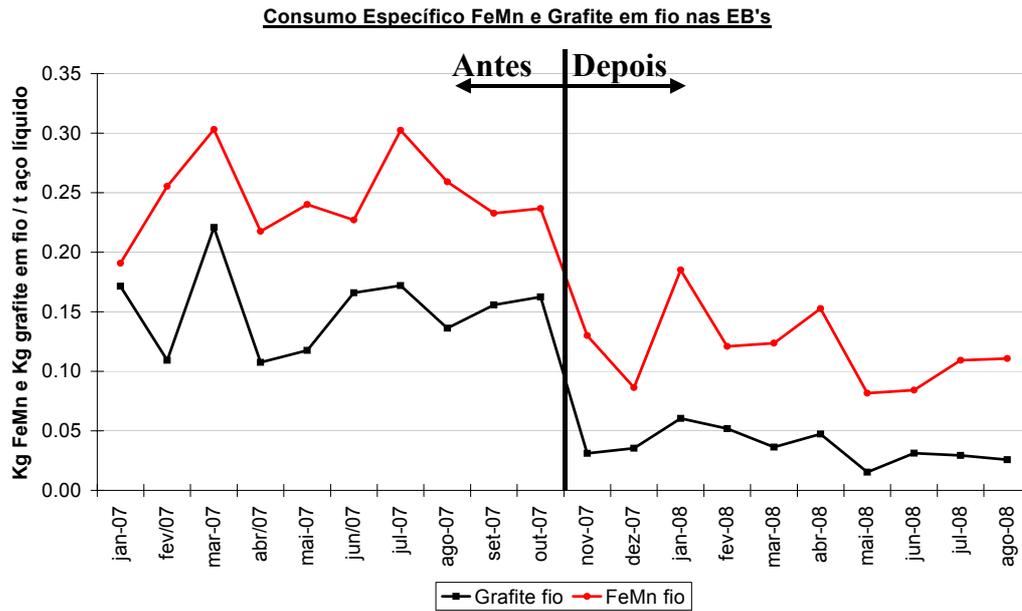


Figura 4 – Consumos específicos de arames de FeMn e Grafite.

As alterações na rotina operacional foram bem assimilada pelos operadores, não havendo alterações significativas nos índices operacionais da aciaria.

Existe um potencial significativo de redução de custo, porém difícil de ser mensurada. Considerando somente os aços SAE 1006 obteve-se uma redução no custo de R\$ 0,15/t aço demonstrado na Figura 5.

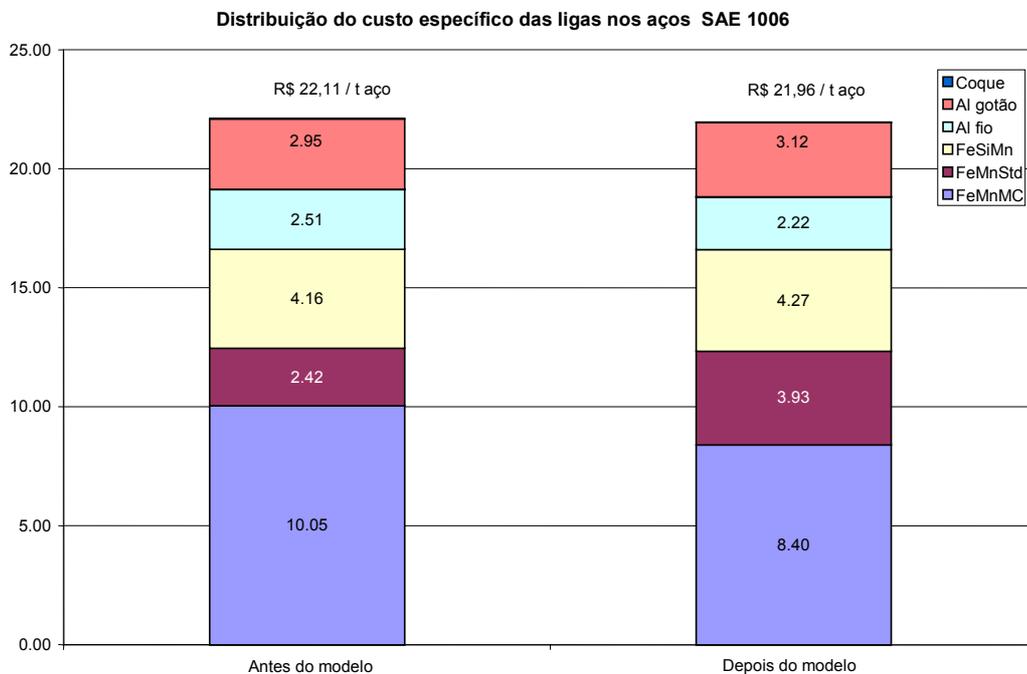


Figura 5 – Distribuição do custo específico das ligas nos aços SAE 1006

4 CONCLUSÕES

Os modelos matemáticos desenvolvidos na CSN, geraram uma economia de aproximadamente R\$ 3,0 milhões após 10 meses de implantação e projeta uma economia anual de R\$ 4,0 milhões.

A redução de correções nas unidades de refino do aço promoveu melhorias ambientais e menor exposição dos operadores as atividades de risco durante o processamento de corridas (injeção de ferroligas) nas Estações de Borbulhamento de Argônio.

O desenvolvimento dos modelos matemáticos pelo próprio corpo técnico da empresa garante um total domínio tecnológico. Além disso os algoritmos foram elaborados considerando as condições específicas da CSN, o que permite alcançar todo potencial de mérito do modo operacional.

BIBLIOGRAFIA

- 1 SUSAKI, K.; AZEVEDO, V.C.; SILVA, A C.S. Redução de custo das adições de ferroligas e alumínio na fabricação do aço. In: SEMINÁRIO TECNOLÓGICO DA COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 27., 2005, Volta Redonda, RJ. [S.n.t.]
- 2 ANDERSON, E.D.; ZIMMERMAN, C. Bath oxygen analysis and utilization. Ladle metallurgy principles and practices. S.l.: Carnegie-Mellon University, 1985.
- 3 CHAGAS, B.R.S.; RUA, J.M.; PEREIRA, C.F. Sistema de cálculo das adições na panela através de modelo de programação linear. In: USIMINAS SIMPÓSIO COAÇO/COREF, 1984, Rio de Janeiro, RJ.
- 4 TOYODA, T.; TANIGUCHI, H.; ISHIKAWA, M. Report for the improvement in CSN steelmaking area. Japão, 1988.
- 5 GONÇALVES, L.C.; BAPTISTA, L.A.S.; PEREIRA, C.L.; AZEVEDO, S.R.C. Automação do cálculo das adições finais na aciaria LD da CSN. In: SIMPÓSIO COAÇO/COFOR, 1982, Vitória, ES.