

# DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA OTIMIZAÇÃO DAS ADIÇÕES DE FERROLIGAS E DESOXIDANTES

Vanessa Cavalheiro de Azevedo <sup>1</sup>

Antonio Augusto Martins <sup>2</sup>

Antonio Carlos Sant'Anna da Silva <sup>3</sup>

Fernando da Rocha Vieira Pinto <sup>4</sup>

Mac Donald de Souza Arruda <sup>5</sup>

## Resumo

A redução de custo é uma busca permanente, objetivada em todas as fases do processo de fabricação do aço. Os processos produtivos que consomem elevados volumes de matérias-primas, e envolvem uma grande diversidade de insumos, apresentam excelentes oportunidades de redução de custo. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar os procedimentos de automatização dos cálculos das adições de ferroligas e desoxidantes para os processos de vazamento do aço – Metalurgia de Panela -, e de refino secundário – Estações de Borbulhamento de Argônio -, visando minimizar o custo específico desses materiais e padronizar os procedimentos operacionais, com foco na flexibilidade operacional e opções de ligas existentes no mercado. Desenvolve-se um algoritmo matemático, atualizado em tempo real por eventos de processo, que seleciona as melhores opções de materiais, adequadas aos requisitos de qualidade do produto final, e minimiza os custos de produção. A implantação desse trabalho permitiu a utilização de ferroligas de menor custo, sem riscos de desvios, resultando numa redução anual dos custos de produção da CSN da ordem de R\$ 4 milhões.

**Palavras-chave:** Modelo matemático; Ferro-ligas; Aciaria; Refino secundário.

## DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR OPTIMUM ADDITION OF FERROALLOYS AND DEOXIDIZERS

## Abstract

Costreduction is a permanent target, pursued in all steel production phases. Production processes that use high volumes of raw materials and big amounts of inputs present excellent opportunities in terms of cost reduction. In this context, the aim of the present paper is to analyse the steps to automatize ferroalloys and deoxidizers calculations for the processes of steel tapping – Ladle Metallurgy -, and secondary refining – Argon Bubbling Stations -, in order to minimize specific cost of these materials and standardize operational procedures, focusing on operation flexibility and options of ferroalloys available in the market. It is developed a mathematical algorithm, updated in real time by the process events, which assess the best materials options, that fulfill all quality requirements of final product, and minimize production costs. As final result, the implementation of this project has allowed the use of low cost ferroalloys, without any risks of operation deviations, resulting in a reduction of CSN's production costs around R\$ 4 million per year.

**Key words:** Mathematical model; Ferroalloy; Steel plant; Secondary refining.

<sup>1</sup>Engenheira Química, Engenheira Sênior, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Rod. BR393, Lúcio Meira km 5.001, s/n, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: vanessa.azevedo@csn.com.br

<sup>2</sup>Engenheiro Metalúrgico, Coordenador de Projetos Especiais, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Rod. BR393, Lúcio Meira, km 5.001, s/n, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: amartins@csn.com.br

<sup>3</sup>Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro Especialista, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Rod. BR393, Lúcio Meira, km 5.001, s/n, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: antonio.csantanna@csn.com.br

<sup>4</sup>Engenheiro Eletricista/Eletrônico, Especialista em Tecnologia da Informação, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Rod. BR393, Lúcio Meira, km 5.001, s/n, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: frvp@csn.com.br

<sup>5</sup>Engenheiro Eletricista, Especialista em Tecnologia da Informação, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Rod. BR393, Lúcio Meira, km 5.001, s/n, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: macdonald@csn.com.br

## I INTRODUÇÃO

A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) possui três convertedores a oxigênio (LD), duas Estações de Borbulhamento de Argônio (EBs), um Desgaseificador a vácuo (RH), um Forno Panela e três máquinas de lingotamento contínuo.

Nos convertedores LD, o oxigênio soprado pela lança reage com os elementos do gusa, oxidando-os e produzindo calor. No final do sopro, o aço não se apresenta na sua composição química objetivada, sendo necessárias adições de ferroligas e desoxidantes. O custo das adições desses materiais representa, em média, cerca de 6,3% do custo total de produção das placas de aço da CSN. Evidentemente, esse percentual varia em função da composição química dos aços.

Iniciado nos primeiros meses de 2005, e se estendendo por dois anos e meio, foram desenvolvidos e implantados dois algoritmos para a realização dos cálculos das adições. Um deles foi implantado na etapa de vazamento e o outro, no refino dos aços nas EBs.

Estruturado com base nos princípios termodinâmicos, porém com forte equacionamento estatístico, por intermédio de correlações e regressões múltiplas de resultados industriais, os modelos foram integrados a outros sistemas operacionais e a controladores lógicos programáveis, tornando-se uma ferramenta precisa e eficiente no controle de processo da aciaria e na consequente redução de custo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A dissolução dos elementos no aço líquido é regida pela termodinâmica e pela cinética das reações. Considerando que os valores necessários para cada elemento respeitam esses princípios, as quantidades das ligas calculadas derivam de um balanço de massa ajustado empiricamente, conforme pode ser representado pela Equação 1:

$$Q_L = \frac{\Delta E \times Q_{\text{aço}}}{(E_M \times \text{Rend} \times 0,01)} \quad [\text{kg}] \quad (1)$$

em que:

- $Q_L$  = quantidade de ferroliga ou desoxidante calculado [kg];
- $\Delta E$  = diferença entre o teor objetivado do elemento no aço e o seu teor ao final de sopro [%];
- $Q_{\text{aço}}$  = massa total de aço líquido [kg];
- $E_M$  = teor do elemento no ferroliga ou desoxidante [kg]; e
- $\text{Rend}$  = rendimento do elemento  $E_M$  na correção [%].

Na realidade, a simplicidade dos valores atribuídos aos rendimentos resume, de forma prática, a complexidade das condições de equilíbrio entre os elementos dissolvidos no aço líquido e os produtos da desoxidação, como também a sequência com que as reações ocorrem.

A estrutura completa do modelo está representada na Figura 1.

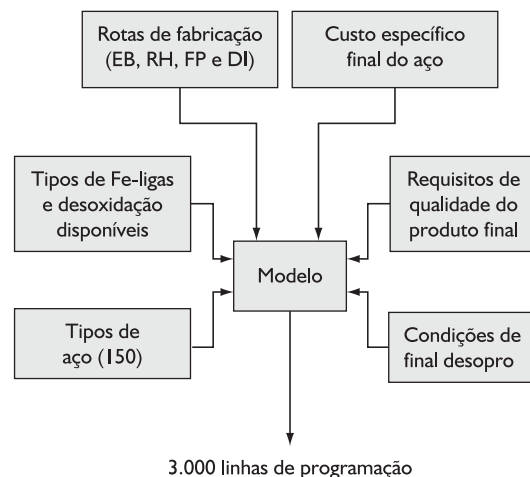


Figura 1. Estruturação do modelo de adição.

### 2.1 Cálculo das Adições para Etapa de Vazamento

No algoritmo desenvolvido para as adições, utilizam-se os 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.

O modelo permite, para cada especificação química, o cálculo das ligas em função do rendimento. Pode ainda estabelecer uma quantidade fixa ou, simplesmente, não utilizar a liga. Para os cálculos, são estabelecidos valores objetivos após o vazamento 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.<sup>(1)</sup> A situação ideal é aquela em que a reação com o oxigênio é realizada com os elementos de liga de menor custo, cabendo aos demais apenas a função de elemento de liga para prover as propriedades mecânicas necessárias. Pelo princípio de fabricação das ligas ferro-silício (FeSi) e ferro silício-manganês (FeSiMn) e, também, pelo poder de desoxidação desses materiais, é mais atrativa, do ponto de vista econômico, a desoxidação do aço líquido com essas ligas do que com alumínio.

A mesma comparação pode ser estabelecida com relação às ligas de manganês que possuem diferentes teores de carbono. Esse elemento vem agregado a uma liga de custo relativamente baixo, o ferro manganês *standard* (FeMnST), quando comparado às ligas de manganês com teores de carbono mais baixos.

No caso particular da CSN, os aços com teores de carbono menor ou iguais 0,08%, e com limite máximo de teor de silício igual a 0,02%, correspondem a 65% da carteira de produtos. Para esses aços, o carbono e o silício seriam elementos indesejados, podendo exercer, todavia, a função de desoxidação. Com relação ao alumínio e manganês, elementos desejados, caberia além da desoxidação, a função de elementos de liga essenciais à obtenção das propriedades mecânicas. A Figura 2 ilustra esquematicamente a situação ideal de controle.<sup>(2)</sup>

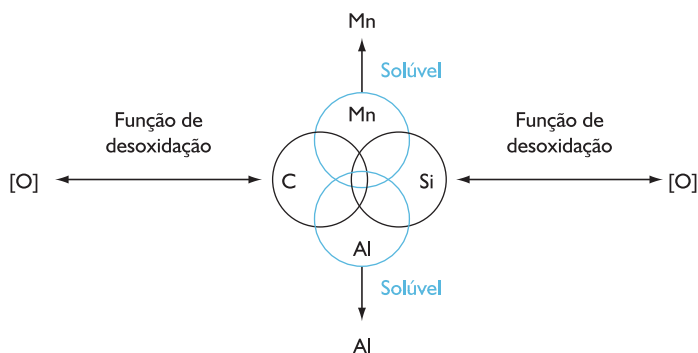


Figura 2. Situação ideal de controle das funções das ligas adicionadas ao aço.

Baseado nesses conceitos, o modelo está estruturado para as adições das ligas FeSi, FeSiMn, FeMnST e FeMnMC (ferro manganês médio carbono). O peso de alumínio, nos casos em que é adicionado, é definido por meio de equações em função das outras ligas que compõem a mistura para vazamento. Cada equação é obtida por meio de regressão múltipla, tendo como variáveis o teor de oxigênio dissolvido no aço antes do vazamento e o teor de alumínio objetivado, sendo que os coeficientes são devidamente ajustados em função dos resultados industriais.<sup>(3,4)</sup>

Outras ligas, tais como ferro-nióbio, ferro-fósforo, ferro-cromo, etc, são adicionadas de acordo com as quantidades calculadas pela Equação 1.

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

As Estações de Borbulhamento de argônio, respondem por 55% do refino dos aços na CSN e têm a finalidade de permitir ajustes finos de composição química dos aços, através de máquinas de injeção de arames. Assim, dada a relevância dessa etapa do processo de fabricação do aço na CSN, as EBs foram contempladas 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 daquela utilizada no vazamento. Foi realizado um balanço de massa simplificado, como apresentado na Equação 1, para cada elemento nas corridas em que os valores objetivados não foram atingidos na etapa de vazamento.

As correções de alumínio são calculadas em função do teor de oxigênio dissolvido ou do teor de alumínio analisado pela técnica de espectrometria óptica, de acordo com a metodologia ilustrada esquematicamente na Figura 3.<sup>(5)</sup>

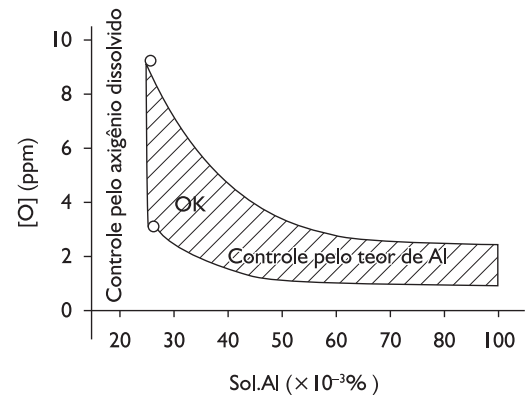


Figura 3. Forma de controle das ligas adicionadas ao aço.<sup>(4)</sup>

Para valores de oxigênio dissolvido maiores ou iguais a 15 ppm, utiliza-se a Equação 2:

$$Q_{Al} = \frac{C_1 + (C_2 \times Al_{obj}) + (C_3 \times \frac{54}{48} \times [O] \times Q_{aço} \times 0,01)}{E_{Al} \times 0,01} \text{ [kg]} \quad (2)$$

Para valores de oxigênio dissolvido menores que 15 ppm aplica-se a Equação 3:

$$Q_{Al} = \frac{(\%Al_{obj} - \%Al_{real}) \times Q_{aço}}{E_{Al} \times Rend \times 0,01} \text{ [kg]} \quad (3)$$

Nestas equações tem-se a seguinte simbologia:

- $Q_{Al}$  = quantidade de alumínio calculado [kg];
- $Al_{obj}$  = alumínio objetivado [%];
- $Al_{real}$  = alumínio obtido em amostras analisadas pela técnica de espectrometria óptica [%];
- $[O]$  = oxigênio dissolvido no aço [%];
- $Q_{aço}$  = massa total de aço líquido [kg];
- $E_{Al}$  = teor de alumínio na liga [%];
- $Rend$  = Rendimento de alumínio na correção [%];
- $C_1$  = massa de alumínio [kg];
- $C_2$  = constante dependente do grau do aço [adimensional];
- $C_3$  = constante função do nível de oxidação do aço [adimensional].

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar os benefícios econômicos dos modelos de cálculo das adições no vazamento e nas Estações de Borbulhamento de Argônio, implantados em Dezembro e Novembro de 2007, respectivamente, foram utilizadas estratégias distintas com o objetivo 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 FeMnST 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 produção desses aços, antes e após a implantação do modelo de cálculo das adições, são apresentadas na Figura 4.

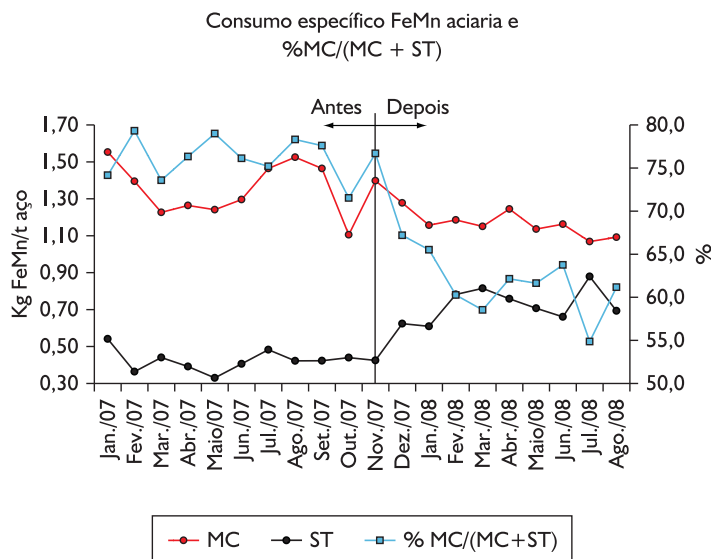


Figura 4. Participação das ligas FeMn nos aços SAE1006 e 1008.

Com relação às Estações de Borbulhamento de Argônio, responsáveis por pequenos ajustes na composição química dos aços, a implantação do modelo teve como principal objetivo reduzir as correções de ligas, que são realizadas através da injeção de arames.

As tabelas estáticas não permitiam a otimização do processo do ponto de vista econômico. O objetivo principal, nesse caso, foi a substituição dos arames utilizados nas Estações de Borbulhamento, de elevado custo, por materiais a granel, de menor custo, durante o vazamento. Os resultados dos consumos específicos dos arames de FeMn e Grafite, antes e após a implantação do modelo de cálculo de adição, são apresentados na Figura 5. Para esta avaliação são considerados todos os aços refinados nesse equipamento.

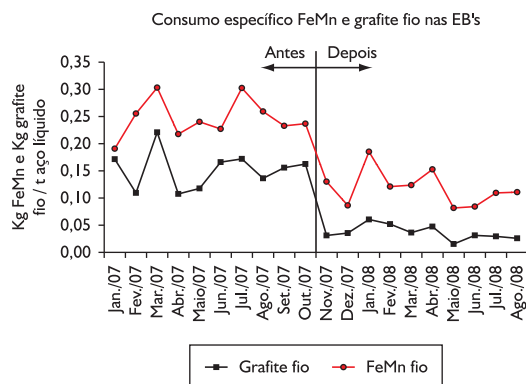


Figura 5. Consumos específicos de arames de FeMn e Grafite.

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

### 4 CONCLUSÃO

Os modelos matemáticos para cálculo da adição de ferroligas e desoxidantes desenvolvidos e implantados na CSN geraram uma economia da ordem de R\$ 4,0 milhões/ano. Em adição, a redução de correções nas unidades de refino do aço resultou também em melhorias ambientais e menor exposição dos operadores em atividades de risco, injeção de ferroligas, durante o processamento das corridas nas Estações de Borbulhamento de Argônio.

As operações de cálculo e adições foram otimizadas, tornando-se muito mais rápidas e precisas.

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 particulares da CSN, permitindo maximizar o retorno econômico do projeto.

### Agradecimentos

Os autores agradecem, em especial, a colaboração do Sr. Katsujiro Susaki, engenheiro especialista da CSN na época da implantação do projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 ANDERSON, E. D.; ZIMMERMAN, C. Bath oxygen analysis and utilization. In: FRUEHAN, R.J. *Ladle metallurgy: principles and practices*. Chelsea: Book Crafters, 1985. Apêndice 3, p. 79-88.
- 2 SUSAKI, K.; AZEVEDO, V. C.; SILVA, A. C. S. Redução do custo das adições de ferroligas e alumínio na fabricação do aço. In: SEMINÁRIO TECNOLÓGICO DA CSN, Volta Redonda, 2005. [Trabalho não publicado].
- 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. *Anais...* São Paulo: ABM, 1984. p. 59-72.
- 4 GONÇALVES, L. C. et al. Automação do cálculo das adições finais na aciaria LD da CSN. In: SIMPÓSIO COAÇO/COFOR, 1982, Vitória. *Anais...* São Paulo: ABM, 1982. p. 89-98.
- 5 NKK. *Assistência técnica da NKK à CSN*. Volta Redonda, 1988. [Relatório interno].

Recebido em: 3/11/2009

Aceito em: 5/04/2010