



AVALIAÇÃO DA TÉCNICA *POST-STIRRING* NOS CONVERTEDORES DE 170 TONELADAS DA USIMINAS¹

Hugo Filipe Parreiras Gonçalves²
Amilton Carlos Campos Pinheiro Filho³
Carlos André Ruy Carneiro⁴
Tulio Carvalho da Silva Araújo⁵

Resumo

Este trabalho visa apresentar os resultados da aplicação da técnica *post-stirring* nos convertedores da Aciaria 2 da Usiminas Ipatinga. Os testes consistiram basicamente na rinsagem do banho com injeção de argônio após o fim de sopro de oxigênio, utilizando-se ventaneiras localizadas no fundo do convertedor, por um período predeterminado. Os resultados mostraram que a prática do *post-stirring* permitiu a redução média de 30 ppm no teor de fósforo e 256 ppm no teor de oxigênio dissolvido no aço. Foi possível concluir que a técnica de *post-stirring* é uma prática importante para a melhoria do processo. Além de reduzir os níveis de fósforo no aço, verificou-se um grande potencial de redução no consumo de material desoxidante, reduzindo custos e melhorando a limpidez do aço.

Palavras-chave: *Post-stirring*; Converteador LD; Teor de oxigênio.

AVALIATION OF THE *POST-STIRRING* TECHNIQUE IN THE 170 TONS USIMINAS CONVERTERS

Abstract

The present paper longs to present the results of the application of the *post-stirring* technique in the converters of Usiminas in Ipatinga. The tests consisted basically in the rinsing of the metal bath with argon injection after finished the oxygen blowing, through tuyeres placed in the bottom of the converters, for a pre established period. The results showed that the *post-stirring* technique allowed an average reduction of 30 ppm in the phosphorus content, and a mean decrease of 256 ppm in the oxygen content. It was possible to conclude that *post-stirring* technique is effective in the process optimization. Besides reducing the phosphorus content in the steel, it was verified a huge opportunity to reduce the consumption of deoxidizing materials, reducing costs and improving the steel cleanness.

Key words: *Post-stirring*; LD Converters; Oxygen content.

1 *Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.*

2 *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista; Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG; hugo.goncalves@usiminas.com.*

3 *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista; Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG; amilton.cardoso@usiminas.com.*

4 *Engenheiro Metalurgista; Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG; carlos.carneiro@usiminas.com.*

5 *Membro da ABM; Engenheiro de Materiais; Gerência de Converteadores da Usina I; Usiminas; Ipatinga, MG; tulio.araujo@usiminas.com.*



1 INTRODUÇÃO

Em convertedores BOF com sopro pelo topo, conhecidos como processo convencional, a agitação do banho é promovida essencialmente pela energia de impacto do jato de oxigênio colidindo com o banho metálico, e pelo borbulhamento do gás CO gerado na descarburização. No entanto, em determinadas regiões, existem “zonas mortas”, onde há deficiência de agitação e misturamento.

A instalação de ventaneiras nas solas de convertedores para injeção de gases incorporou ao processo convencional as vantagens de agitação oferecidas pelos processos onde o sopro de oxigênio ocorre pelo fundo, corrigindo as deficiências de misturamento. A ascensão do gás injetado em direção à superfície do banho líquido promove sua recirculação, garantindo homogeneidade de composição e temperatura em todo o banho metálico. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do processo de sopro combinado em convertedor LD.

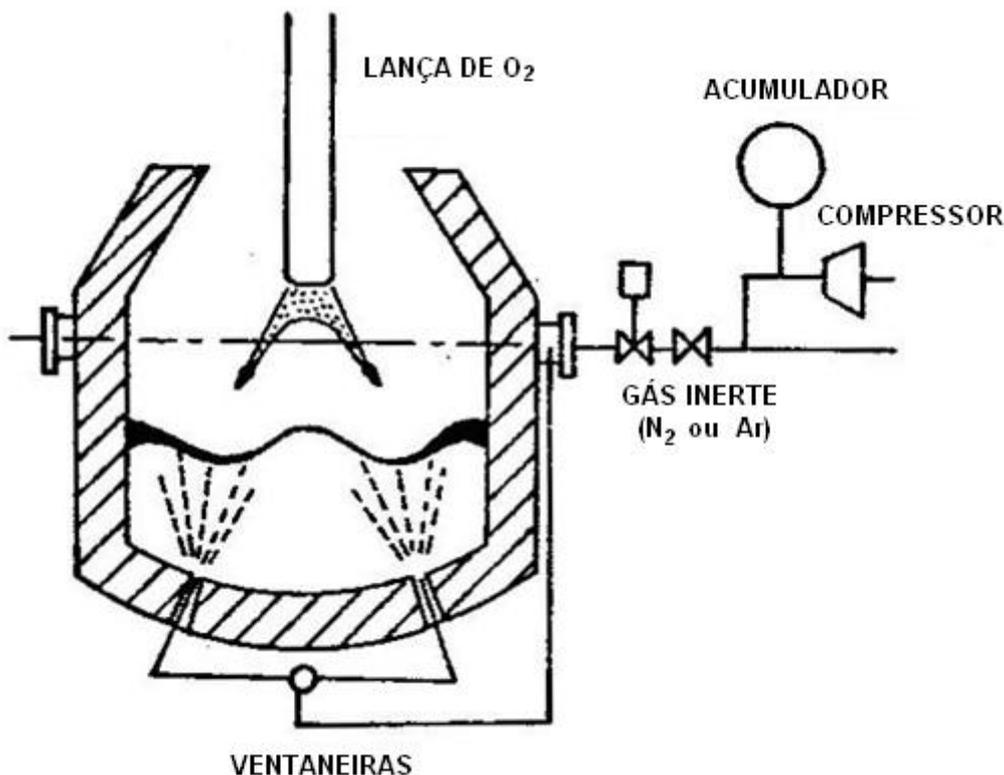


Figura 1. Visão esquemática de um convertedor munido de sopro combinado LD-KGC.

Nos processos de refino do aço, depois de terminado o sopro, permanece um desequilíbrio entre o aço e a escória. A escória formada ao fim de sopro possui altos teores de FeO e CaO dissolvidos, características favoráveis à remoção do fósforo. No entanto, devido à queda na taxa de descarburização nos momentos finais do sopro, e conseqüentemente à baixa força de agitação promovida pelo gás CO formado, a condição da escória fim de sopro não é devidamente aproveitada na desfosforação.⁽¹⁾

A técnica *post-stirring* ou rinsagem/agitação após o sopro consiste na injeção de gás inerte pelas ventaneiras por um determinado período de tempo depois de terminado o sopro de oxigênio. Ela possibilita utilizar plenamente as características da escória, fazendo com que o sistema aço-escória se aproxime mais das condições de



equilíbrio. O gás injetado na sola do convertedor provoca uma agitação do sistema. A agitação provocada pela rinsagem melhora a interação metal-escória através de uma constante renovação da superfície de contato entre estas fases, aumentando a extensão das reações de refino.

Vários benefícios metalúrgicos da técnica *post-stirring* são descritos na literatura,^(2,3) tais como: o aumento da partição de fósforo; redução no nível de oxidação do banho; redução do teor de FeO da escória, aumentando o rendimento metálico e reduzindo, conseqüentemente, o desgaste dos refratários; entre outros.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os benefícios metalúrgicos decorrentes da prática *post-stirring* nos convertedores da Usiminas Ipatinga, bem como, comparar os resultados obtidos com os registrados na literatura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As experiências de *post-stirring* foram realizadas nos convertedores 4 e 5 da Aciaria 2 da Usiminas Ipatinga em 35 corridas. Os convertedores possuem capacidade de 170 toneladas e são munidos de oito ventaneiras cada, conforme o esquema na Figura 2.

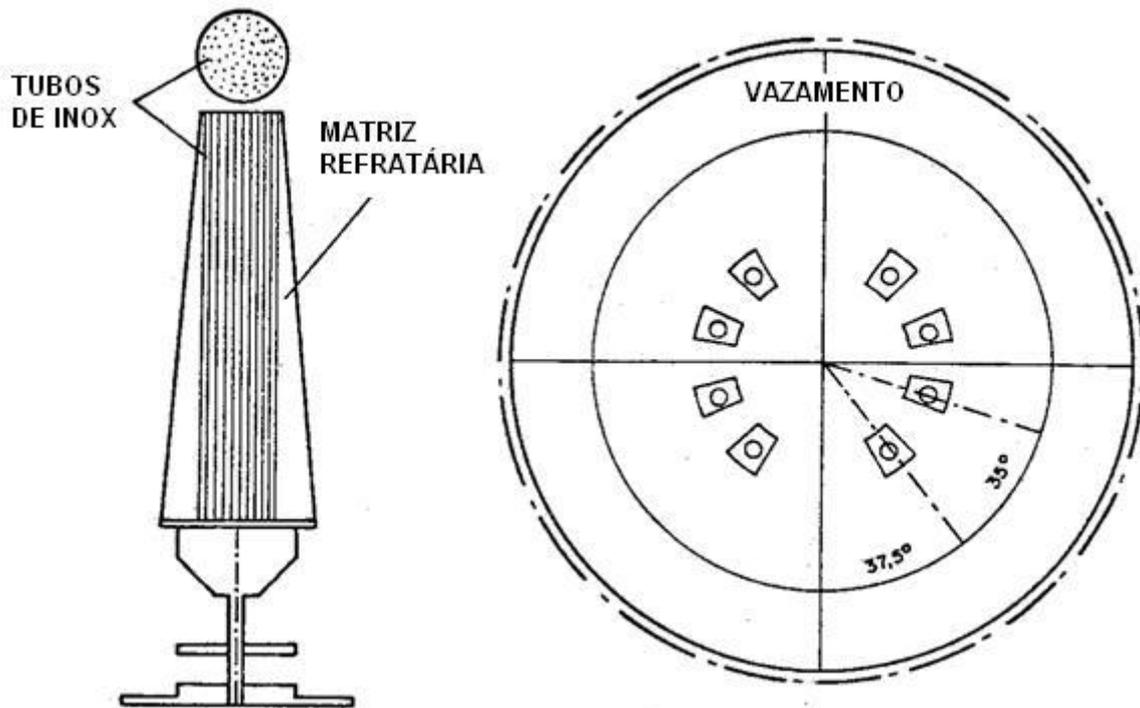


Figura 2. Visão esquemática de uma ventaneira, e sua distribuição no fundo do convertedor.

As ventaneiras são constituídas de uma matriz de refratário de MgO com tubos de aço inoxidável no interior, por onde ocorre a injeção dos gases. Suas dimensões são 130 mm de diâmetro na face em contato com o banho líquido e 1.086 mm de altura. O gás (nitrogênio ou argônio) é injetado nas oito ventaneiras através de uma única linha, controlada por uma válvula, um medidor de pressão e um medidor de vazão. As vazões mínimas e máximas permissíveis no sistema são 60 Nm³/h e 800 Nm³/h, respectivamente.

Os testes de *post-stirring* foram realizados conforme as etapas descritas abaixo:



- 1^a: terminado o sopro de oxigênio, foi retirada uma amostra de aço, do tipo pirulito, e medidos os níveis de oxidação e a temperatura do banho, utilizando-se a sublança com sensor de oxigênio;
- 2^a: realizou-se a injeção de argônio através das ventaneiras a uma vazão de 100 Nm³/h a 200 Nm³/h (equivalente a 0,01 Nm³/t.min a 0,02 Nm³/t.min) por um período aproximado de 2 minutos; e
- 3^a: após o término da injeção de gás, foi recolhida uma nova amostra de aço e medida a oxidação e temperatura do banho.

As amostras de aço foram analisadas em laboratório químico através de espectrometria de raios-X. Os resultados obtidos foram analisados utilizando ferramentas estatísticas.

3 RESULTADOS

Os teores de fósforo das amostras de aço antes e após o período de post-stirring são apresentados na forma de *boxplot*, na Figura 3.

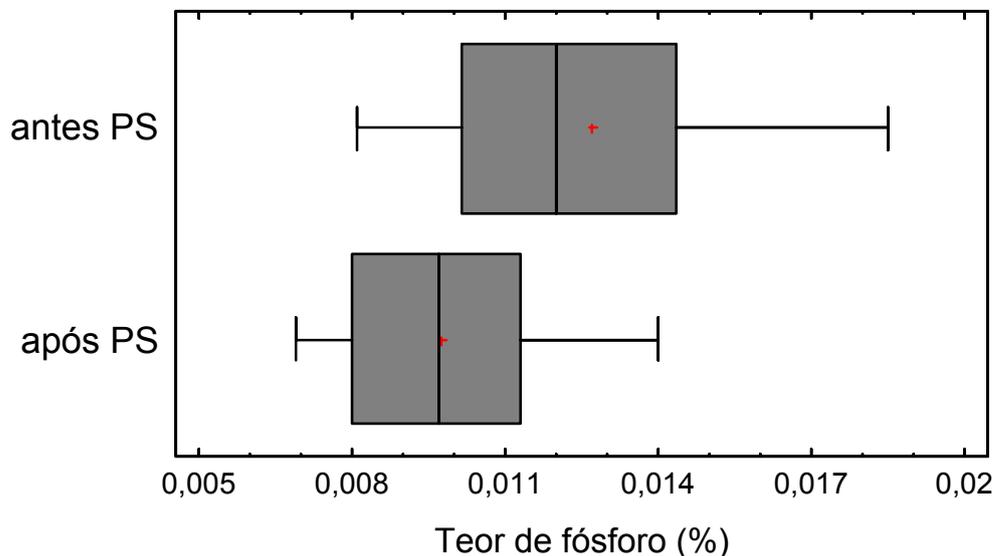


Figura 3. Teores de fósforo no aço antes e após o período de *post-stirring*.

Conforme visualizado na Figura 3, ocorreu uma diminuição global do teor de fósforo e uma redução considerável na dispersão dos resultados após o post-stirring. A análise mostrou que existe diferença estatística significativa entre as médias dos teores de fósforo antes e após a realização do *post-stirring*, com um nível de confiança de 95%. Nas amostras de aço fim de sopro (antes do teste), o teor de fósforo médio foi de 0,013% (130 ppm) com um desvio padrão de 0,003% (30 ppm), enquanto para as amostras de aço após a injeção de gás, estes valores foram de 0,010% e 0,002% (100 ppm e 20 ppm), respectivamente.

É apresentada na Figura 4 a variação do teor de fósforo (ΔP), calculada pela diferença entre o teor de fósforo do aço antes e após o post-stirring. Ela possui valores positivos, indicando desfosforação do banho líquido durante o período de rinsagem.

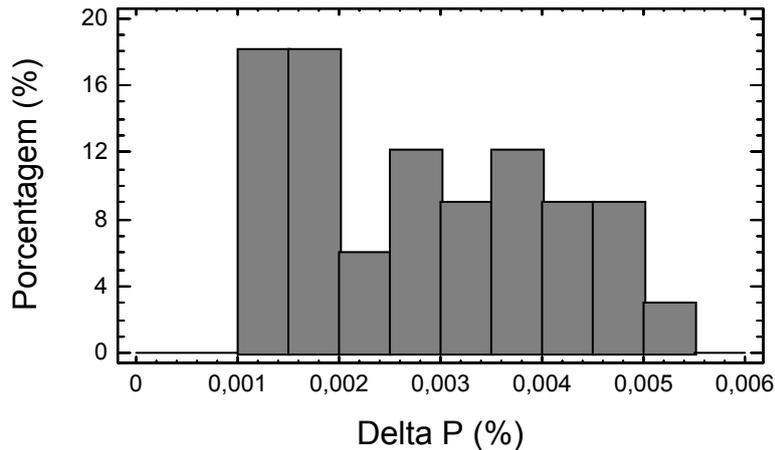


Figura 4. Variação do teor de fósforo em porcentagem (ΔP) após a técnica *post-stirring*.

Com base na Figura 4, observa-se redução do teor de fósforo do aço variando de 0,001 a 0,005% (10 ppm a 50 ppm), sendo a média 0,0030% com um desvio padrão de 0,0015% (30 \pm 15 ppm). Baseado nestes resultados, entende-se que a injeção de gás após o final de sopro permitiu uma redução de até 35% do teor de fósforo no aço. Estes resultados estão em acordo a literatura.

Estudos realizados por Rose e Becker,⁽³⁾ em um convertedor de 220 toneladas, mostraram que a prática do *post-stirring* reduziu o teor de fósforo do aço em até 40 ppm. Guy, Grosejan e Le Maire⁽¹⁾ **Erro! Fonte de referência não encontrada.** obtiveram resultados mais substanciais. Com a injeção de 0,015 Nm³/(t.min), estes autores verificaram uma diminuição do teor de fósforo de até 100 ppm, além de redução na dispersão dos resultados.

Guy, Grosejan e Le Maire⁽¹⁾ **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Bruckhaus e Lachmund⁽²⁾ mencionam que reduções de 100 ppm ocorrem nos casos em que o teor de fósforo no aço logo, após o fim de sopro, é mais elevado (entre 0,025% e 0,035%). Neste trabalho, estes teores estiveram preferencialmente abaixo de 0,020%, e, por isso, não foi verificada redução desta proporção.

Na Figura 5 é apresentado um gráfico que correlaciona os teores de fósforo do aço antes e após a injeção de gás.

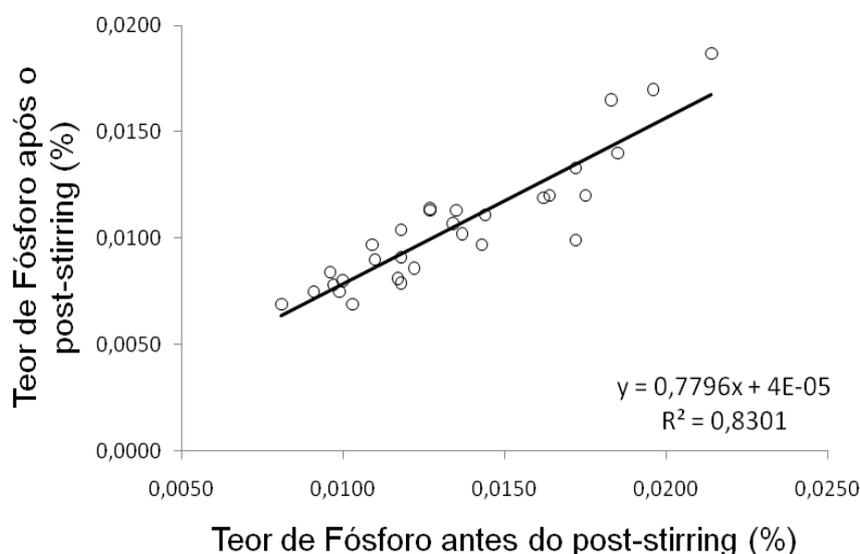




Figura 5. Correlação entre teor de fósforo do aço antes e após o período de *post-stirring*. Conforme Figura 5, existe uma correlação direta entre os teores de fósforo antes e após o *post-stirring*. A correlação indica que o teor de fósforo após o *post-stirring* pode ser representado através da equação 1, desde que o teor após o fim de sopro seja conhecido.

$$P_{\text{após PS}} = 0,7796 \times \%P_{\text{antes PS}} + 4 \times 10^{-5} \quad (1)$$

Onde,

$P_{\text{após PS}}$ = teor de fósforo após o *post-stirring* (%)

$P_{\text{antes PS}}$ = teor de fósforo antes do *post-stirring* (%)

A equação 1 pode ser utilizada como uma ferramenta auxiliar para definição da necessidade de resopro devido a alto teor de fósforo. Neste caso, a utilização do *post-stirring* não gera os efeitos nocivos do resopro, tais como: aumento da oxidação e do teor de nitrogênio no aço.

O mecanismo envolvido na desfosforação durante o *post-stirring* pode ser explicado pelas seguintes etapas propostas:

- 1ª etapa: o fósforo dissolvido no banho é transportado até a camada limite por convecção devido à movimentação do banho;
- 2ª etapa: após a difusão do fósforo através da camada limite, ele é oxidado pelo FeO na interface da escória, formando o pentóxido de fósforo (P_2O_5); e
- 3ª etapa: o P_2O_5 é fixado na escória devido a formação de um composto estável com o CaO dissolvido.

Neste caso, a utilização do *post-stirring* tende a favorecer as duas primeiras etapas do mecanismo de desfosforação, pois a agitação gerada aumenta a renovação da interface metal/escória e reduz o tamanho da camada limite pelo aumento da turbulência.

Das 35 corridas acompanhadas, somente em 18 foi possível realizar a medição de oxidação e temperatura antes e após o *post-stirring*. As demais apresentaram somente uma ou nenhuma medição devido às condições inadequadas do processo durante os experimentos. Os resultados médios destas duas variáveis são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valor médio de temperatura e oxigênio livre aferidos no aço antes e após o *post-stirring*

	T antes PS (°C)	O antes PS (ppm)	T após PS (°C)	O após PS (ppm)
Média	1664	1257	1652	985

Observa-se na Figura 6 grande dispersão dos resultados, devido às diferentes características das corridas. O teste de comparação das médias confirmou a variação do teor de oxigênio com a prática *post-stirring*. A oxidação do banho ao fim de sopro variou entre 500 ppm e 2.000 ppm. Após a injeção de argônio, essa o teor foi reduzida para a faixa de 500 ppm a 1.500 ppm (Figura 6).

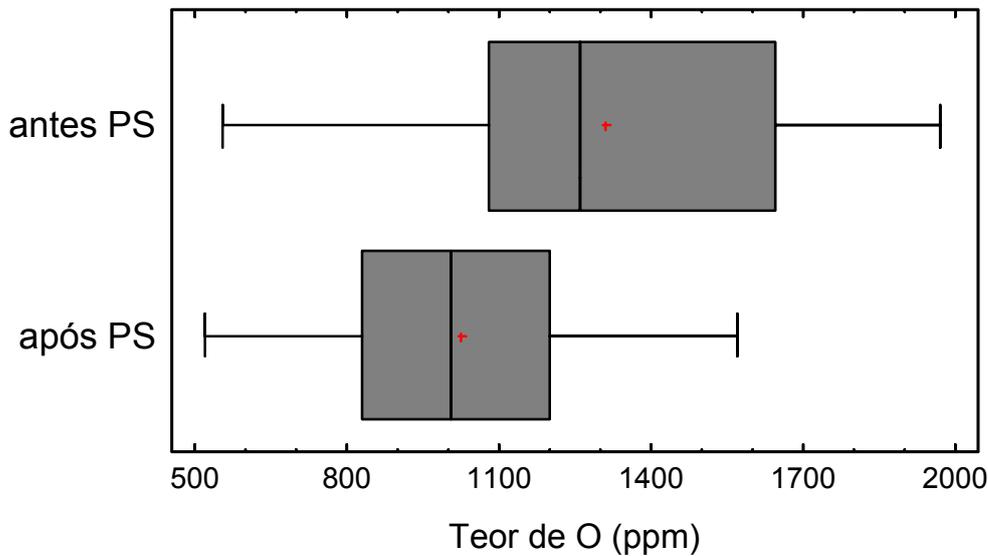


Figura 6. Teores de oxigênio dissolvido no aço antes e após o período de *post-stirring*.

A redução do teor de oxigênio no banho líquido, calculada pela diferença entre os teores de oxigênio antes e após a injeção de argônio, apresentou média e desvio padrão de 256 ppm e 178 ppm respectivamente, podendo atingir reduções do oxigênio livre de até 600 ppm.

Redução do teor de oxigênio do aço durante o *post-stirring* também foi objeto de estudo para Rose e Becker.⁽³⁾ Conforme apresentado na Figura 7, para aços com teores de oxigênio de 875 ppm após o fim de sopro, foi verificada redução de 350 ppm durante um período de rinsagem de 100 segundos. Quando este período é extrapolado para 300 segundos, a redução chega a 475 ppm de oxigênio dissolvido. Ainda nesta mesma figura, é visto que o aumento de oxigênio dissolvido no aço ocorre de maneira acentuada nos últimos segundos do sopro de oxigênio (aproximadamente 95% do tempo de sopro).

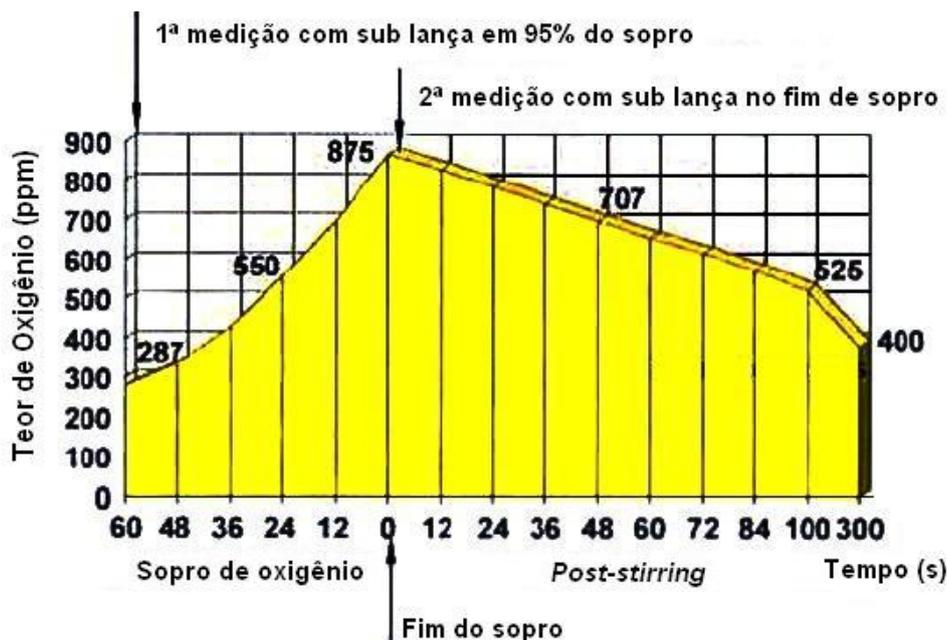


Figura 7. Teor de oxigênio em função do tempo de *post-stirring* obtido por Rose et al.⁽³⁾



Notou-se uma correlação entre a variação do oxigênio e o seu teor logo após o fim de sopro, conforme apresentado na Figura 8, comprovando que quanto maior for o grau de oxidação do aço no fim de sopro, maior será a redução do seu teor de oxigênio durante o período de *post-stirring*.

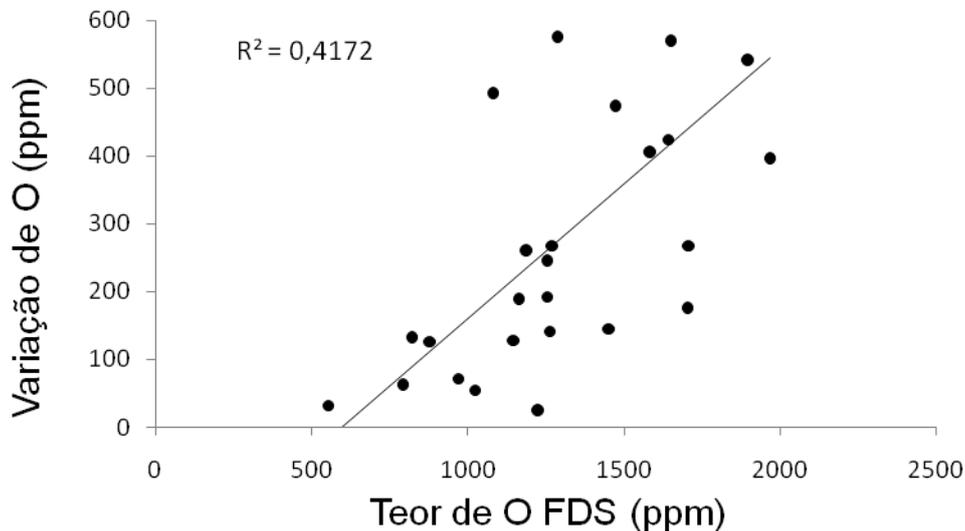


Figura 8. Correlação entre variação de oxigênio e teor de oxigênio ao fim de sopro.

Esta mesma correlação foi observada por Bruckhaus e Lachmund,⁽²⁾ mas com uma menor dispersão dos dados, conforme visualizado na Figura 9, onde fica claro a correlação linear entre a quantidade de oxigênio removida e o teor de oxigênio do aço ao fim de sopro.

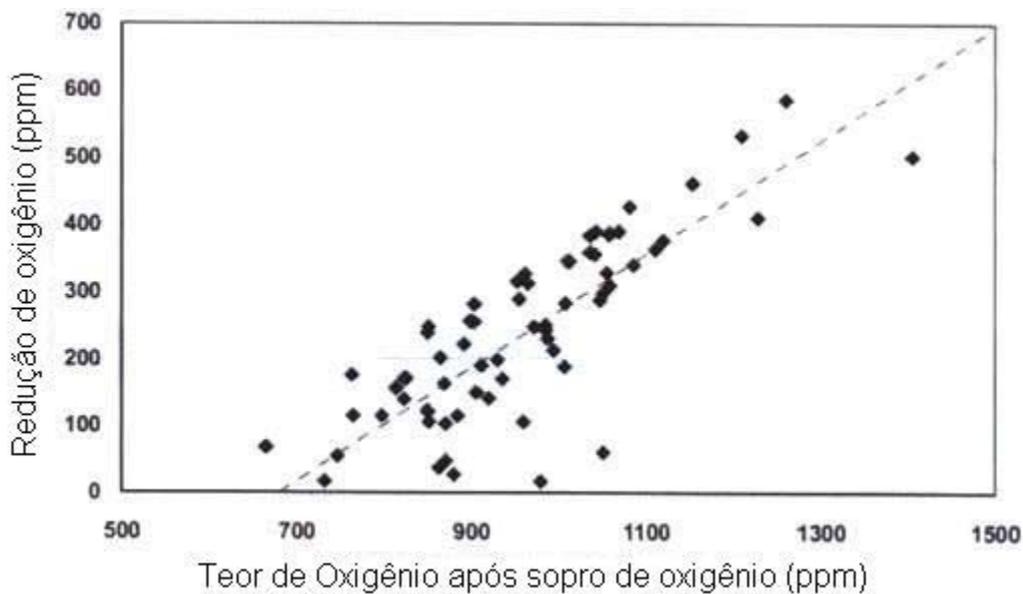


Figura 9. Quantidade de oxigênio removido durante post-stirring em função do teor de oxigênio fim de sopro por Bruckhaus e Lachmund.⁽²⁾

O teor de oxigênio dissolvido no aço e o teor de FeO na escória são parâmetros determinantes no processo de fabricação do aço. Altos teores destes elementos caracterizam o banho em estado oxidado, o que não é desejável do ponto de vista



de qualidade, principalmente no quesito limpidez. Baixo teor de oxigênio no aço representa menor consumo de agente desoxidante, enquanto menor teor de FeO na escória indica maior rendimento metálico e menor desgaste do revestimento refratário. Um cálculo baseado nos resultados obtidos neste trabalho, mostra que é possível obter uma redução média de 0,3 kg de alumínio por tonelada de aço para desoxidação.

Devido à agitação do banho durante o *post-stirring*, é normal a queda de temperatura do aço líquido. Durante os experimentos, a queda média observada foi de 12°C com um desvio padrão de 7°C. Guy, Grosejan e Le Maire⁽¹⁾**Erro! Fonte de referência não encontrada.** verificaram que em seus experimentos a perda de temperatura durante a rinsagem do banho não excedeu os 10°C, e que seria a mesma perda caso o banho ficasse estático durante o mesmo período de tempo.

Em relação ao tempo despendido para realização dos testes, ele não influenciou a sequência de produção, pois a técnica foi aplicada às corridas que não possuem vazamento direto, utilizando-se o tempo de espera da análise da amostra de aço fim de sopro para executar o *post-stirring*.

Os resultados que apresentam a variação do teor de fósforo e de oxigênio no aço durante o *post-stirring*, comprovam que o metal e a escória ao fim de sopro estão fora do equilíbrio. A injeção de gás por aproximadamente dois minutos permitiu que as reações de refino se aproximassem mais do equilíbrio, melhorando os resultados de composição química do aço ao fim de sopro. Este fato pode ser explicado principalmente pela redução da camada limite e pela redução de temperatura entre metal e escória, que estendem as reações de refino.

Outros benefícios que certamente são obtidos com a prática não foram medidos ou descritos neste trabalho. A variação do teor de FeO na escória é de inviável medição, uma vez que seria necessário bascular o convertedor antes da rinsagem, exigindo um tempo maior para as práticas, por isso não foi possível mensurar um provável aumento no rendimento metálico. Em relação ao revestimento refratário, seria difícil ver melhorias com a prática *post-stirring* praticada somente no período dos testes.

5 CONCLUSÃO

Foi possível avaliar os benefícios metalúrgicos da técnica *post-stirring* nos convertedores da Usiminas Ipatinga. Os testes consistiram basicamente na injeção de gás no banho metálico depois de terminado o sopro de oxigênio, por um período predeterminado. A técnica foi útil para redução nos teores de fósforo e oxigênio do aço, atingindo valores mais próximos do equilíbrio. Foi observada uma redução média de 30 ppm de fósforo no aço, chegando a atingir reduções de até 35% em relação ao teor ao fim de sopro. Adicionalmente, foi verificada uma redução média de aproximadamente 250 ppm no teor de oxigênio, podendo esta chegar até 600ppm. Esta redução impacta diretamente no nível de limpidez do aço, pois a quantidade de alumínio necessária para desoxidação é reduzida, e conseqüentemente a geração de alumina também diminui.

Foi possível concluir que o metal e a escória estão fora do equilíbrio termodinâmico ao final do sopro. A subsequente injeção de gás inerte pelo fundo do convertedor favoreceu a constante renovação da área de contato entre as fases, além de reduzir a camada limite, contribuindo para que as reações de refino se aproximassem do equilíbrio.



REFERÊNCIAS

- 1 GUY, D.; GROSEJAN, J. C.; LE MAIRE, M. Industrial development of bottom gas injection in top blown converters. *63rd Steelmaking Conference*, Washington, DC, 1980. p .5-11.
- 2 BRUCKHAUS, R.; LACHMUND, H. Stirring strategies to meet the highest metallurgical requirements in the BOF process. In: *AISTech 2007. The Iron & Steel Technology*, Indianapolis, Ind, 2007. p. 44-50.
- 3 ROSE, L; BECKER, W. Bottom stirring in the converter using the MTBI process. *Steel Times International: Oxygen Steelmaking*. July, 1994. p. 18-21.