

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA TAXA DE DESCARBURAÇÃO EM FUNÇÃO DA VAZÃO DE ARGÔNIO UTILIZADA NA PERNA DE SUBIDA DO DESGASEIFICADOR A VÁCUO RH

Marlon José dos Anjos Silva¹

Roberto Parreiras Tavares²

Resumo

Neste trabalho, desenvolve-se uma investigação sobre a variação da constante aparente de descarburização (k_c), em função da vazão de argônio utilizada no desgaseificador a vácuo RH, otimizando a vazão em cada etapa da descarburização. Acompanharam-se 97 corridas de aço ultra baixo carbono, utilizando três vazões de argônio diferentes (80 Nm³/h, 110 Nm³/h e 140 Nm³/h). Foram retiradas amostras de aço aos 0, 6 e 12 minutos de cada corrida. Para a primeira etapa da descarburização obtiveram-se valores semelhantes de k_c nas três vazões testadas. Nesse caso, reduziu-se esta vazão de 110 Nm³/h para 80 Nm³/h, o que representa uma redução no consumo de argônio de 18.900 Nm³/ano. Obteve-se, também, uma menor queda de temperatura do aço durante o tratamento e um menor volume de gás a ser succionado pelo sistema de vácuo. Para a segunda etapa da descarburização manteve-se a vazão de 140 Nm³/h, por apresentar o maior valor de k_c .

Palavras-chave: Descarburização; Desgaseificador RH; Argônio.

STUDY OF THE VARIATION AT DECARBURIZATION RATE AS FUNCTION OF THE ARGON FLOW RATES IN THE UPLEG SNORKEL OF THE RH DEGASSER

Abstract

This work investigates the variation of the apparent decarburization constant (k_c) as function of the argon flow rate injected in a RH degasser. It allows optimization of the flow rate at each decarburization stage. For this, 97 ultra low carbon steel heats were analyzed using three different argon flow rates (80 Nm³/h, 110 Nm³/h e 140 Nm³/h). Steel samples were taken at 0, 6 and 12 minutes of each heat. In the first decarburization stage, the k_c values were similar for the three tested flow rates. In this case, this flow rate was reduced from 110 Nm³/h to 80 Nm³/h and the argon consumption decreased in 18.900 Nm³/year. With this change, the temperature drop during the treatment and the gas volume to be sucked by the vacuum system were reduced. In the second decarburization stage, the flow rate of 140 Nm³/h remained due to the highest k_c value.

Key words: Decarburization; RH degasser; Argon.

I INTRODUÇÃO

O tratamento para descarburização caracteriza-se pela reação do carbono dissolvido no aço com o oxigênio produzindo gás CO, que é retirado pelo sistema de vácuo. A nucleação de bolhas de CO pode ocorrer na superfície e no seio do banho, na bolha de argônio e na superfície

do revestimento refratário.^(1,2) A Figura 1 mostra quatro possíveis sítios de reação no reator RH.⁽³⁾

Cálculos termodinâmicos mostram que seria possível atingir 1,0 ppm de carbono a uma pressão menor que 2,0 Torr. Porém, isso não ocorre na prática, pois, em geral, processos industriais a vácuo não atingem o equilíbrio termodinâmico e são limitados pela cinética das reações.⁽⁴⁾

¹Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Especialista de Produção da Aciaria da Usiminas, Rua Luther King, 94, ap. 101, Cidade Nobre, Cep 35162385, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: marlon.silva@usiminas.com

²Engenheiro Metalurgista, PhD, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627, Bloco 2, sala 3636, Pampulha, Cep 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: rtavaresufmg@yahoo.com

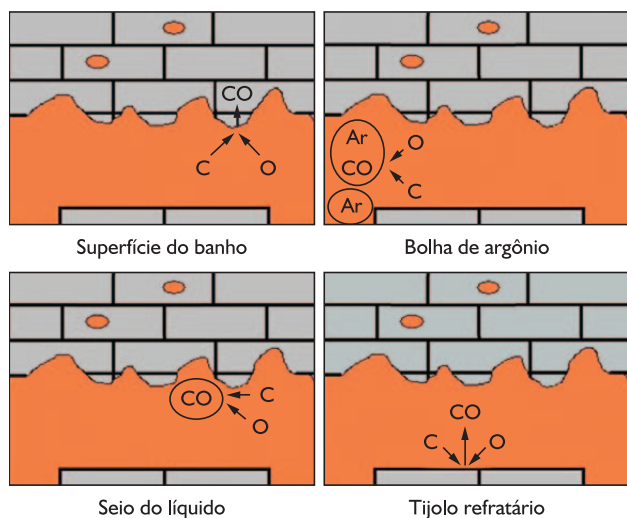


Figura 1. Desenhos esquemáticos de quatro sítios de reação possíveis no RH.⁽³⁾

Os teores de carbono do equilíbrio não são atingidos pelo fato de haver um valor crítico desse carbono abaixo do qual a reação de descarburização depende da velocidade de difusão do carbono, o que faz com que a velocidade de descarburização se torne muito baixa na etapa final do tratamento.

No processo RH, o grau de vácuo e a concentração de carbono mudam consideravelmente durante o tratamento, por isso, os fatores que governam a taxa de descarburização alteram com o tempo.⁽⁵⁾

Para caracterizar a descarburização no RH pode-se levar em conta duas etapas:^(6,7) a etapa inicial no qual a descarburização atinge valores em torno de 30 ppm e a etapa final, para valores inferiores a este. Na primeira etapa, a pressão parcial de CO em equilíbrio com o carbono e o oxigênio no aço é muito alta. Nessa etapa, a descarburização pode acontecer inclusive no seio do metal. Durante a segunda etapa, a descarburização acontece principalmente na superfície exposta ao vácuo. Nessa etapa, ocorre o decréscimo na taxa de descarburização⁽⁸⁾ devido à baixa concentração dos reagentes (carbono e oxigênio) e ao decréscimo da área interfacial de reações entre a fase líquida e gasosa.⁽¹⁾

Podem ser tomadas algumas medidas para maximizar a taxa de descarburização no processo RH.⁽⁵⁾ Na primeira etapa deve-se propiciar a maximização da taxa de circulação e o aumento da taxa de evacuação com a criação de um vácuo suficiente para proporcionar reação, inclusive no seio do banho metálico. Na segunda etapa da descarburização deve-se incrementar a turbulência na superfície, propiciando um aumento na área superficial do banho metálico em contato com as baixas pressões no interior do vaso. Esse efeito pode ser alcançado aumentando-se a vazão de argônio.

Porém, nem sempre o aumento na vazão de argônio leva a um aumento na taxa de descarburização.

Dependendo das condições estudadas, existe um valor limite a partir do qual o incremento na vazão de argônio não aumenta a taxa de descarburização.^(6,9,10)

A vazão de argônio nos bicos de injeção é uma das variáveis de controle mais importantes do processo RH, pois determina a taxa de circulação, influenciando na cinética das reações⁽¹¹⁾ e, em determinadas condições, na taxa de descarburização. Portanto, a eficiência do RH está ligada ao valor dessa vazão de argônio utilizada, que pode variar de acordo com a característica de cada equipamento.

Tendo em vista a importância do conhecimento da descarburização no processo, este estudo tem como objetivo investigar a variação na taxa de descarburização em função da vazão de argônio nos bicos da perna de subida do desgaseificador a vácuo RH. Em cada etapa do tratamento, objetivou-se conciliar altas taxas de descarburização com a menor vazão de argônio possível, propiciando redução do consumo desse gás no equipamento. As principais características do equipamento utilizado são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características do RH da Aciaria 2 da Usiminas – Ipatinga

Tamanho da corrida (t)	170
Diâmetro do vaso (mm)	2.070
Diâmetro interno da perna (mm)	600
Vazão de argônio (Nm ³ /h)	80 a 140
Número de bicos de injeção de argônio (1 nível)	10
Taxa de circulação aproximada (t/min)	130
Capacidade de sucção a 0,5 Torr (kg/h/t)	3,8

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Realizou-se o tratamento de 97 corridas de aço ultra baixo carbono utilizando uma combinação de três vazões de argônio diferentes em duas etapas de descarburização distintas, totalizando 277 amostras analisadas. Utilizando o teor de carbono obtido nessas amostras para calcular o valor de k_c obtiveram-se 86 valores para a primeira etapa e 94, para a segunda. Em condições normais, o tratamento de descarburização na Usiminas/Ipatinga é de aproximadamente 12 minutos. Definiu-se, portanto, que a primeira etapa da descarburização compreenderia o tempo de tratamento de 0 a 6 minutos e a segunda etapa o tempo restante (de 6 minutos a 12 minutos). Na Usiminas, anteriormente aos testes, utilizava-se como padrão o valor de 110 Nm³/h, na primeira etapa da descarburização, e de 140 Nm³/h, na segunda etapa, distribuídos nos dez bicos de injeção.

Os valores de vazão de argônio utilizados nos testes levaram em consideração o mínimo, para evitar obstrução dos bicos, um valor intermediário e o máximo, utilizado na Usiminas, atualmente, 80 Nm³/h, 110 Nm³/h e 140 Nm³/h, respectivamente.

Para minimizar a influência das outras variáveis que poderiam interferir nos resultados dos testes foram selecionadas corridas com as seguintes condições:

- vazões de argônio testadas alternadamente na mesma sequência de corridas;
- temperatura inicial de tratamento entre 1.570°C e 1.620°C;
- teores de oxigênio entre 500 ppm e 1.100 ppm (medidos aos 2 minutos de vácuo);
- nenhum sopro de oxigênio e nenhuma adição durante o período dos testes;
- corridas com teores de carbono inicial inferior a 0,04% e enxofre inferior a 0,02%.

Foram retiradas três amostras de cada corrida, sendo a primeira amostra ao final do vazamento do aço do convertedor para a panela (amostra C₀); a segunda, aos 6 minutos de tratamento no RH (amostra C₆), e a terceira, aos 12 minutos de tratamento no RH (amostra C₁₂).

Para a retirada da amostra foi utilizado um amostrador tipo “pirulito”, com revestimentos especiais para prevenção de contaminação. A análise de carbono das amostras foi realizada em um forno de indução com análise de carbono por infravermelho.

De posse dos resultados dos teores de carbono, avaliou-se a taxa de descarburização pelo cálculo da constante aparente de descarburização. Para a primeira etapa do tratamento utilizaram-se as amostras C₀ e C₆ como carbono inicial e final, respectivamente. Para a segunda etapa utilizaram-se as amostras C₆ e C₁₂ como carbono inicial e final. Esse cálculo é realizado pela Equação 1:^(1,15)

$$K_{ci,j} = - \frac{\ln \left(\frac{\%C_f - \%C_{eq}}{\%C_{in} - \%C_{eq}} \right)}{t_{in,f}} \quad (1)$$

Na equação os termos indicam:

- K_{ci,j} = constante aparente de descarburização na etapa i para a vazão j (min⁻¹);
- %C_f = percentagem final de carbono em cada etapa;
- %C_{in} = percentagem inicial de carbono em cada etapa;
- %C_{eq} = percentagem de carbono no equilíbrio;
- t_{in,f} = tempo decorrido entre as amostragens inicial C_{in} e final C_f (min).

Para o cálculo do carbono em equilíbrio foram utilizados a temperatura, o teor de oxigênio e a pressão de CO obtida durante o tratamento das corridas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a Equação 1, pode-se observar que, quanto maior o valor de K_{Ci}, menor é o teor de carbono obtido ao final da etapa de tratamento. Portanto,

pretende-se utilizar os maiores valores de k_{Ci} quando o objetivo do tratamento é o de se obter maiores taxas de descarburização.

3.1 Constante Aparente de Descarburização na Primeira Etapa (K_{Ci})

Um resumo dos valores obtidos para k_{Ci} na primeira etapa da descarburização é apresentado na Tabela 2 e na Figura 2.

Tabela 2. Valores da constante aparente de descarburização obtidos para as três vazões testadas

Vazão de argônio	k _{Ci} (min ⁻¹)		Número de casos
	Média	Desvio padrão	
80 Nm ³ /h	0,34	0,07	27
110 Nm ³ /h	0,33	0,05	34
140 Nm ³ /h	0,34	0,06	25

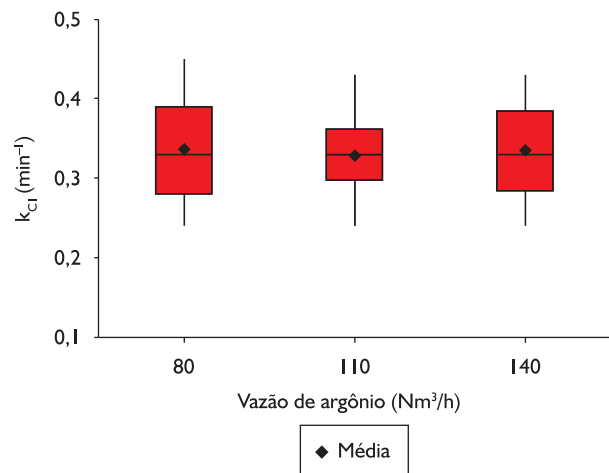


Figura 2. Valores obtidos para as três vazões na primeira etapa.

Analisando os resultados, pode-se constatar que os valores médios da constante aparente de descarburização obtidos para as três vazões testadas são semelhantes. Resultados similares são obtidos em outros trabalhos^(7,10) analisando o teor de carbono final atingido para tratamentos sem distinção de etapas de descarburização. Portanto, para a primeira etapa do tratamento, optou-se por reduzir a vazão utilizada anteriormente de 110 Nm³/h para 80 Nm³/h, obtendo menor consumo de argônio, sem reduzir a constante aparente de descarburização.

Uma explicação para os resultados seria que, devido ao elevado teor de carbono e oxigênio na primeira etapa do tratamento, o transporte de massa é facilitado e a reação de descarburização acontece em elevadas taxas,

podendo ocorrer inclusive no seio do líquido. Esse fato, somado ao efeito da agitação adicional do banho devido ao grande volume de gás gerado, torna irrelevante o incremento da vazão de gás inerte nessa etapa.

Nos primeiros 6 minutos de tratamento ocorre uma grande geração de gás CO, como está apresentado na Figura 3. Esse gás, juntamente com o argônio injetado, sofre expansão de volume devido ao aumento da temperatura e a redução da pressão à medida que

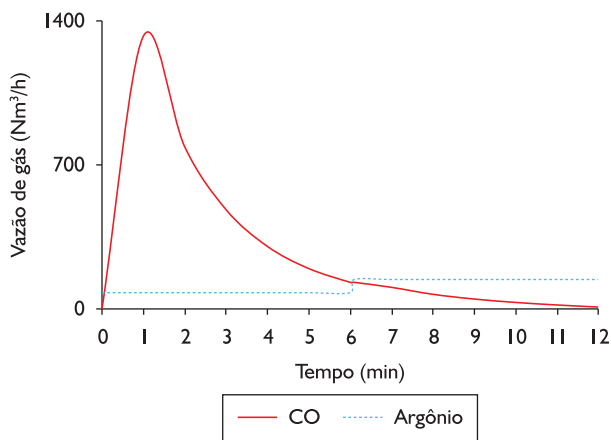


Figura 3. Estimativa da vazão de gás no sistema durante a descarbonização no RH para vazões de argônio de 80 Nm³/h, na primeira etapa do tratamento, e 140 Nm³/h, na segunda.

as bolhas seguem seu caminho ascendente na perna de subida. Esse aumento de volume pode afetar a circulação de aço devido à ocupação da área útil da perna de subida com excesso de gás. Conclusão semelhante é obtida por Tsukihashi.⁽¹²⁾ Portanto, o excesso de injeção de argônio nessa etapa pode prejudicar a renovação de aço na câmara de vácuo, podendo culminar inclusive na redução da taxa de descarbonização. Nessa etapa, é importante manter o equipamento em condições de promover a máxima capacidade de sucção dos gases. Outra opção é de se trabalhar com pré-vácuo para acelerar a remoção dos gases do sistema.

Outro fato relevante é que essa elevada geração de CO, somada às altas taxas de injeção de gás inerte, pode aumentar o volume de *splash* no sistema, aumentando a incidência de cascão nas partes superiores do equipamento. Portanto, a redução da vazão de gás inerte nessa etapa pode minimizar esse efeito.⁽¹³⁾

Quando existem limitações do equipamento quanto à taxa de sucção dos gases, altas taxas de injeção de argônio podem dificultar a obtenção de baixas pressões na câmara de vácuo, principalmente nos primeiros instantes do tratamento, onde o volume de gás gerado é muito grande. Portanto, essa redução da vazão na primeira

etapa pode melhorar o desempenho do equipamento no que diz respeito à obtenção dessas baixas pressões.

3.2 Constante Aparente de Descarbonização na Segunda Etapa (k_{C_2})

Um resumo dos valores obtidos de k_{C_2} na segunda etapa da descarbonização é apresentado na Tabela 3 e na Figura 4.

Tabela 3. Valores da constante aparente de descarbonização obtidos para as três vazões testadas

Vazão de argônio	k_{C_2} (min ⁻¹)		Número de casos
	Média	Desvio padrão	
80 Nm ³ /h	0,11	0,05	30
110 Nm ³ /h	0,12	0,05	32
140 Nm ³ /h	0,14	0,06	32

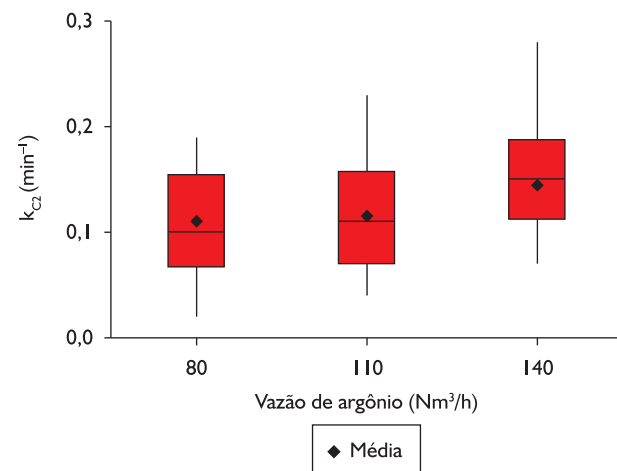


Figura 4. Valores obtidos para as três vazões na segunda etapa.

A média da constante aparente de descarbonização na segunda etapa para a vazão de 140 Nm³/h apresenta valores superiores aos das vazões de 80 Nm³/h e 110 Nm³/h. Alguns autores afirmam que incrementos na vazão de argônio nas etapas finais do tratamento aumentariam a taxa de descarbonização,^(6,14) o que está de acordo com os resultados obtidos.

Foi realizado o teste de hipóteses para comparação das médias. Comparando-se a média da constante aparente de descarbonização obtida para a vazão de 80 Nm³/h e de 140 Nm³/h (0,11 min⁻¹ e 0,14 min⁻¹), pode-se afirmar com 95% de confiança que a média de $k_{C_2,80}$ é menor que a média de $k_{C_2,140}$. As hipóteses comparadas são mostradas na Tabela 4.

Analogamente, comparando-se a média da constante aparente de descarbonização obtida para a vazão de 110 Nm³/h e de 140 Nm³/h (0,12 min⁻¹ e 0,14 min⁻¹), pode-se afirmar, com 94% de confiança, que a média de

Tabela 4. Condições utilizadas no teste de hipóteses

Hipótese nula	média de $k_{C_{2,80}}$ – média de $k_{C_{2,140}} = 0,0$
Hipótese alternativa	média de $k_{C_{2,80}}$ – média de $k_{C_{2,140}} < 0,0$

$k_{C_{2,110}}$ é menor que a média de $k_{C_{2,140}}$. Desse modo, para a segunda etapa do tratamento, optou-se por manter a vazão de 140 Nm³/h, não alterando o padrão nessa etapa.

Uma explicação para os resultados obtidos é que, na segunda etapa do tratamento, a reação de descarburização ocorre principalmente na superfície do banho e das bolhas de gás. Nessa etapa, a geração de CO reduz drasticamente, como pode ser visto na Figura 3, diminuindo o volume de gás no sistema e reduzindo a agitação do banho. O aumento da vazão de argônio nessa etapa aumenta a área de reação, introduzindo maior perturbação na superfície do banho e oferecendo um substrato para nucleação através das bolhas. Nessa etapa, o controle do processo se dá por transferência de massa. Portanto, ações no sentido de incrementar a agitação no sistema aumentando o coeficiente de transporte de massa podem trazer benefícios ao processo.

3.3 Novo Padrão de Argônio Utilizado

O novo padrão utilizado é apresentado na Figura 5. A divisão do processo de descarburização em duas etapas, utilizando vazões mais baixas na etapa inicial e vazões mais elevadas na etapa final, está de acordo com o proposto por Tembergen.⁽¹⁵⁾

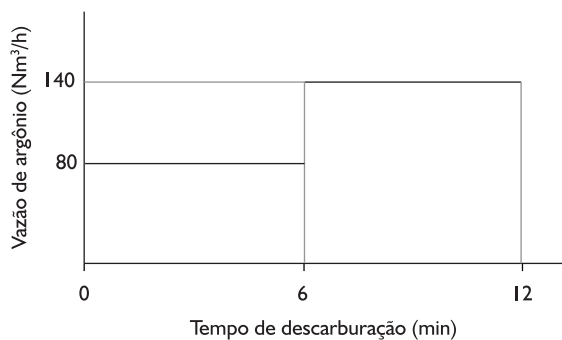


Figura 5. Novo padrão de argônio utilizado.

Com essa alteração, estima-se uma redução no consumo de argônio de aproximadamente 18.900 Nm³/ano. Outro fator importante é a disponibilização desse gás para outras atividades na aciaria.

Outro benefício da redução dessa vazão é a menor queda de temperatura do aço durante o tratamento. O argônio é injetado à temperatura ambiente e, em contato com o aço a aproximadamente 1.600°C, promove uma redução da sua temperatura. Portanto, a redução da vazão de argônio reduz a queda de temperatura do aço. Essa alteração propicia uma redução do consumo anual de 1.360 kg

de alumínio e 845 Nm³ de oxigênio para aquecimento. Ocorre também a redução da geração de alumina no banho, o que pode representar uma melhoria na limpidez dos aços.

A Figura 6 mostra a média do teor de carbono estimado utilizando os valores de k_C obtidos durante os testes. Pode-se observar que, nos primeiros 6 minutos de tratamento, independente da vazão de argônio utilizada, obtém-se o mesmo teor de carbono. Portanto, pode-se utilizar a menor vazão sem afetar o valor de carbono na primeira etapa da descarburização. Para a segunda etapa (de 6 minutos a 12 minutos), quanto maior a vazão de argônio menor é o teor de carbono obtido. Para a vazão de 140 Nm³/h atingem-se valores médios de 12 ppm de carbono, aos 12 minutos de descarburização.

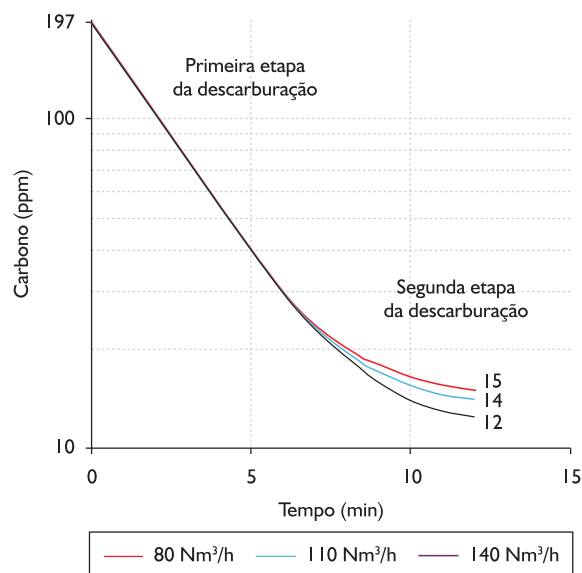


Figura 6. Curva de descarburização para as três vazões de argônio testadas.

4 CONCLUSÕES

Os valores médios da constante aparente de descarburização obtidos (0,34 min⁻¹, 0,33 min⁻¹ e 0,34 min⁻¹) para as três vazões testadas (80 Nm³/h, 110 Nm³/h e 140 Nm³/h) na primeira etapa do tratamento de descarburização são semelhantes. Portanto, para essa etapa foi alterada a vazão de 110 Nm³/h para 80 Nm³/h. O principal benefício dessa alteração foi a redução no consumo de argônio de aproximadamente 18.900 Nm³/ano e, conseqüentemente, a disponibilização desse gás para outras atividades na aciaria.

A média da constante aparente de descarburização na segunda etapa para a vazão de 140 Nm³/h (0,14 min⁻¹) apresenta valores ligeiramente superiores aos das vazões de 80 Nm³/h e 110 Nm³/h (0,11 min⁻¹ e 0,12 min⁻¹, respectivamente). Portanto, para a segunda etapa do tratamento optou-se por manter a vazão de 140 Nm³/h não alterando o padrão nessa etapa.

REFERÊNCIAS

- 1 KISHIMOTO, Y. et al. Decarburization in ultra-low carbon iron under reduced pressure. *ISIJ International*, v. 33, n. 3, p. 391-9, 1993. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.33.391>
- 2 HANNA, R. K. et al. Water modeling to aid improvement of degasser performance for production of ultralow carbon interstitial free steels. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 21, n. 1, p. 37-43, Feb. 1994.
- 3 SILVA, M. J. A.; VIANA, J. F.; ARAÚJO, T. C. S. Modernização do desgaseificador a vácuo da aciaria 2. In: SEMINÁRIO INTERNO DA QUALIDADE, 5., Ipatinga, Usiminas, 2004.
- 4 FRUEHAN, R. J. An introduction to vacuum degassing - part II. *Iron and Steelmaker*, v. 17, n. 7, p. 42-3, July 1990.
- 5 YANO, M. et al. Recent advances in ultralow-carbon steel refining technology by vacuum degassing processes. *Nippon Steel Technical Report*, n. 61, p.15-21, Apr. 1994.
- 6 AHRENHOLD, F. et al. Experience with the second RH degasser at the Beeckerwerth Steel of TKS. In: BRAZILIAN METALS SOCIETY CONGRESS, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: ABM, 2003. p. 19-21.
- 7 GUO, D; IRONS, G. A. Modelling of gás-liquid reactions in ladle metallurgy; Part I; Physical modeling. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 31, n. 6, p. 1447-55, Dec. 2000. <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-000-0029-8>
- 8 PARK, Y-G.; YI, K-W. A new numerical model for predicting carbon concentration during RH degassing treatment. *ISIJ International*, v. 43, n. 9, p. 1403-9, 2003. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.43.1403>
- 9 WEI, J-H.; YU, N-W. Mathematical modeling for RH refining process of molten steel. In: IRONMAKING CONFERENCE, 61., 2002, Nashville. *Proceedings...* Warrendale: *Iron & Steel Society*, 2002. p. 775-92.
- 10 KATO, Y. et al. Décaburation de l'acier à moins de 10 ppm par dégazage au RH avec insufflation d'oxygène. *La Revue de Métallurgie*, v. 89, n. 7, p. 616-21, Jul./Out. 1992.
- 11 RIBEIRO, D. B. et al. *Refino secundário dos aços*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. [Apostila].
- 12 TSUKIHASHI, F.; LI, B. Modeling of circulating flow in degassing vessel water model designed for two-and multi-legs operation. *ISIJ International*, vol. 40, n. 12, p. 1203-9, 2000. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.40.1203>
- 13 HAHN, F. I. et al. Application of the RH process to the production of ultra low carbon steels at Thyssen Stahl AG. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 17, n. 3, p. 43-7, Mar. 1990.
- 14 KUWABARA, T.; et al. Investigation of decarburization behavior in RH-reactor and its operation improvement. *Transactions ISIJ*, v. 28, n. 4, p. 305-14, 1988. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational1966.28.305>
- 15 TEMBERGEM, D.; TEWORTE, R.; ROBEY, R. Vacuum ladle treatment using RH metallurgy. *Metallurgical Plant and Technology International*, v. 30, n. 3, p. 56-63, mar. 2007.

Recebido em: 31/08/2011

Aceito em: 01/02/2012