



AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INJEÇÃO DE GÁS NA CÂMARA DE VÁCUO DO MODELO FÍSICO DE UM DESGASEIFICADOR RH¹

Leonardo Neves²
Hugo Passos Ornelas de Oliveira³
Roberto Parreiras Tavares⁴

Resumo

O processo RH se destaca dentre os outros processos de refino a vácuo, devido à sua alta produtividade e produção de aços de alta qualidade. O princípio do desgaseificador RH consiste na circulação do aço líquido entre a panela e uma câmara onde se faz vácuo. O fluxo do aço é feito por dois dutos que fazem a ligação entre a panela e a câmara de vácuo, sendo um para a subida e outro para a descida do aço líquido, sendo chamados de perna de subida e perna de descida, respectivamente. Para estimar a taxa de circulação do aço líquido no desgaseificador RH, foi utilizada uma técnica que envolve a obtenção de curvas de distribuição de tempos de homogeneização de soluções salinas. Já para a cinética de descarburização, foi estudada a reação de descarburização através da dessorção de CO₂ em soluções alcalinas, pela injeção de ar na base da perna de subida e na base da câmara de vácuo no entorno da perna de subida. A reação foi afetado pela taxa constante do fluxo do gás e os bicos diâmetros. Um aumento no fluxo do gás na câmara de vácuo tende a reduzir a taxa de descarburização. Foi observado que o coeficiente volumétrico de transferência de massa apresentou uma tendência para aumentar a taxa de reação de descarburização quando se aumenta a área da pluma no interior da câmara de vácuo.

Palavras-chave: Desgaseificador RH; Taxa de descarburização; Taxa de circulação; Refino secundário.

EVALUATION OF THE EFFECTS OF GAS INJECTION IN THE VACCUM CHAMBER OF A RH DEGASSER ON MELT CIRCULATION AND DECARBURIZATION RATES

Abstract

Steels with low concentrations of nitrogen, hydrogen and carbon have in large demand lately. The RH process is a secondary refining process that can simultaneously attain significant levels of removal of these interstitial elements from liquid steel. In the RH process, the melt circulation rate plays a very important role in determining productivity of the equipment, since it affects the decarburization rate. In the present work, a physical model of a RH degasser in a 1:5 scale of an industrial reactor from USIMINAS (Minas Gerais, Brazil). This model has been built and used in the study of the circulation rate and of the kinetics of decarburization. The effects of the gas flow rate and of the configurations of the nozzles used in the injection of the gas have been analyzed. The effect of gas injection in the vacuum chamber was also investigated. The decarburization reaction of liquid steel was simulated using a reaction involving CO₂ and caustic solutions. The concentration of CO₂ in the solution was evaluated using pH measurements. The experimental results indicated that the kinetic of decarburization is controlled by mass transfer in the liquid phase. It was also observed that, in certain configurations, the injection of gas in the vacuum chamber can increase the decarburization rate.

Key words: RH degasser; Decarburization rate; Melt circulation; Secondary refining.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

² Mestre em Engenharia Metalúrgica e Minas pela UFMG, leonardoneves.leonardo@gmail.com

³ Técnico em Química Pelo Colégio Técnico da UFMG, hugopassos@ufmg.br

⁴ PhD. em Engenharia Metalúrgica e Minas, MCGILL, University, Canadá, rtavares@demet.ufmg.br



1 INTRODUÇÃO

Os processos de refino a vácuo são essenciais na fabricação de aços de alta qualidade, particularmente dos aços livres de intersticiais (*interstitial free*) - IF e os aços ultrabaixo carbono (*ultra low carbon*) - ULC, com teores de carbono na faixa de 30 ppm, que têm encontrado larga aplicação, principalmente na indústria automobilística.

Dentre os processos de refino a vácuo, destaca-se o processo RH, devido à sua alta produtividade. O princípio do desgaseificador RH consiste na circulação do aço líquido entre a panela e uma câmara onde se faz vácuo. O fluxo do aço é feito por dois dutos que fazem a ligação entre a panela e a câmara de vácuo, sendo um para a subida e outro para a descida do aço líquido, sendo chamados de perna de subida e perna de descida, respectivamente. Neste processo, a intensidade da circulação do aço afeta não só a velocidade das reações, como também a taxa de homogeneização do material na panela e em outra análise, a produtividade do equipamento.

O processo RH tem sofrido mudanças contínuas, com vista à obtenção de maiores índices de qualidade, maiores graus de limpidez, melhor controle da composição química final, mais produtividade e baixos custos, sem que altere drasticamente a rotina da usina.

Características importantes, tais como: tamanho, forma, população e distribuição espacial das bolhas na região superior da perna de subida de aço líquido no RH, "Pluma Gasosa no RH", as características de mistura do aço líquido no vaso a vácuo, sob ponto de vista cinético, são importantes e imprescindíveis para a compreensão e quantificação do comportamento da desgaseificação nesta modalidade de reator.

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo para avaliar as taxas de circulação e de descarburização em um reator RH, analisando o efeito da injeção de gás na base da câmara de vácuo, injeção de gás na perna de subida e do diâmetro dos bicos de injeção.

Para o estimar a taxa de circulação do aço líquido no desgaseificador RH, foi utilizada uma técnica que envolve a obtenção de curvas de distribuição de tempos de homogeneização de soluções salinas. Já para a cinética de descarburização, foi estudada a reação de descarburização através da dessorção de CO₂ em soluções alcalinas, pela injeção de ar na base da perna de subida e na base da câmara de vácuo no entorno da perna de subida.

Esse estudo foi feito empregando um modelo físico similar ao equipamento industrial usado em usinas siderúrgicas. Este modelo foi construído em acrílico, em escala 1:5 em relação ao desgaseificador RH da USIMINAS situado na cidade de Ipatinga no estado de Minas Gerais.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em um modelo físico do desgaseificador RH. Variações em sua configuração foram introduzidas para avaliar os seus efeitos nas taxas de circulação e de descarburização. Neste item serão apresentados os parâmetros adotados nos ensaios no modelo físico, as variáveis utilizadas nos experimentos e uma descrição do aparato experimental. Também serão apresentados os procedimentos para realização dos ensaios para avaliação da taxa

de circulação e da taxa de descarburização, bem como os cálculos para a obtenção da taxa de circulação.

2.1 Aparato Experimental

Para estudar o escoamento do aço líquido no processo RH, foi construído um modelo físico em acrílico, onde foram realizados experimentos para a determinação das taxas de circulação e de descarburização em função do tempo, analisando o efeito das seguintes variáveis:

- vazão de gás injetado na câmara de vácuo;
- vazão de gás injetado nas pernas de subida;
- diâmetro dos bicos de injeção de gás.

A Figura 1 mostra uma vista esquemática do modelo físico do reator RH com os sensores utilizados nos ensaios nas instalações do Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP).

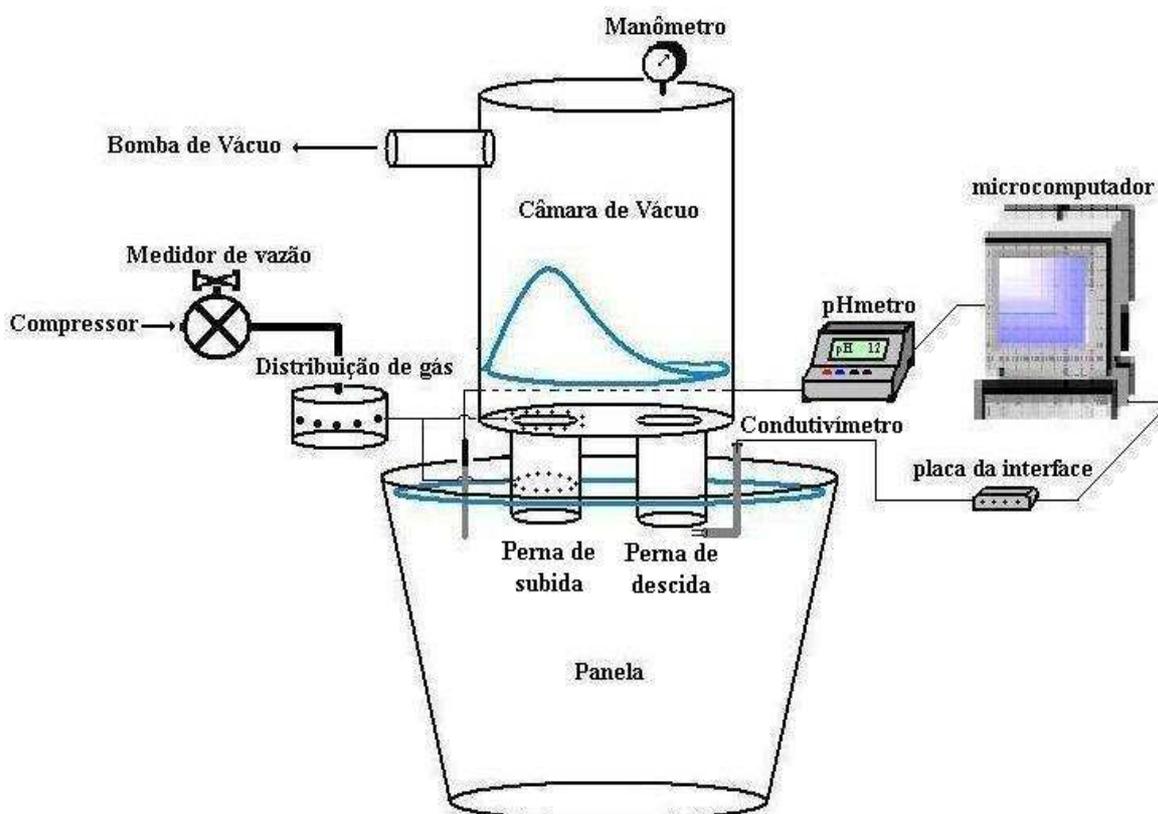


Figura 1 – Vista esquemática do modelo físico do reator RH com os sensores utilizados no teste.

2.1.1 Características do modelo físico

As características do modelo físico e do sistema de injeção de gás são apresentadas na Tabela 1.

Para o estudo da injeção de gás na câmara de vácuo, foram utilizados 12 bicos acoplados na base da câmara de vácuo, dispostos simetricamente no perímetro da perna de subida, como mostrado na Figuras 2a e 2b.

Tabela 1 - Características do modelo físico e do sistema de injeção de gás

Parâmetros	Valores
- diâmetro maior (m)	0,720
- diâmetro menor (m)	0,648
- altura (m)	0,760
- nível do liquido (m)	0,680
- diâmetro (m)	0,420
- altura (m)	0,712
- nível do liquido (m)	0,095
- pressão relativa (mbar)	28,5
- comprimento (m)	0,312
- diâmetro (m)	0,127
- profundidade de imersão (m)	0,135
- distância entre os centros (m)	0,269
- vazão de gás total (l/ min)	500
- bicos na perna de subida:	
- vazão de gás (l/ min)	50 - 450
- número	10
- diâmetro (mm)	1,0;1,5;2,2;2,8
- posição abaixo do nível do liquido, l (m)	0,075
- bicos na câmara de vácuo:	
- vazão de gás (l/ min)	50 - 450
- número	12
- diâmetro (mm)	1,0;1,5;2,2;2,8

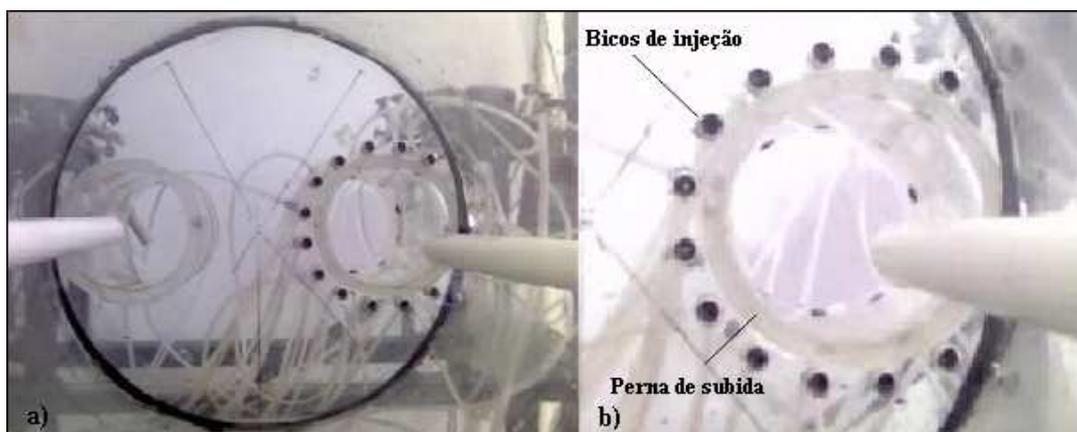


Figura 2 – Detalhes da distribuição dos bicos no interior da câmara de vácuo.

2.2 Experimentos

Dois tipos de experimentos foram realizados no presente trabalho:

- ensaios para a avaliação da taxa de circulação; e
- ensaios para a avaliação da taxa de descarburagem.

Estes ensaios são descritos a seguir.

2.2.1 Taxa de circulação

Para determinar a taxa de circulação foi adotado um método utilizado por Seshadri e Costa,⁽¹⁾ Neste processo, uma solução de cloreto de potássio é injetada na perna de subida sob a forma de um pulso. A concentração de KCl na perna de descida e continuamente monitorizado. Desde que a condutividade elétrica da água seja afetada pela presença de KCl, a sua concentração é calculado com base no

sinal gerado pelo sensor de condutividade elétrica, utilizando uma curva de calibração previamente determinada. A Figura 3 mostra curvas típicas representando a variação da concentração de KCl na perna de descida como uma função do tempo. A taxa de circulação foi estimada utilizando a seguinte equação:

$$\Gamma = \frac{V}{A/\Delta C} \quad (1)$$

Para garantir a confiabilidade dos experimentos, a massa de KCl no equilíbrio foi verificada em todos os testes. Dez experimentos foram realizados para cada condição experimental.

Este método também foi utilizado por e Seshadri et al⁽¹⁾, Almeida et al.⁽²⁾, Vargas e Tavares⁽³⁾ e Silva et al⁽⁴⁾.

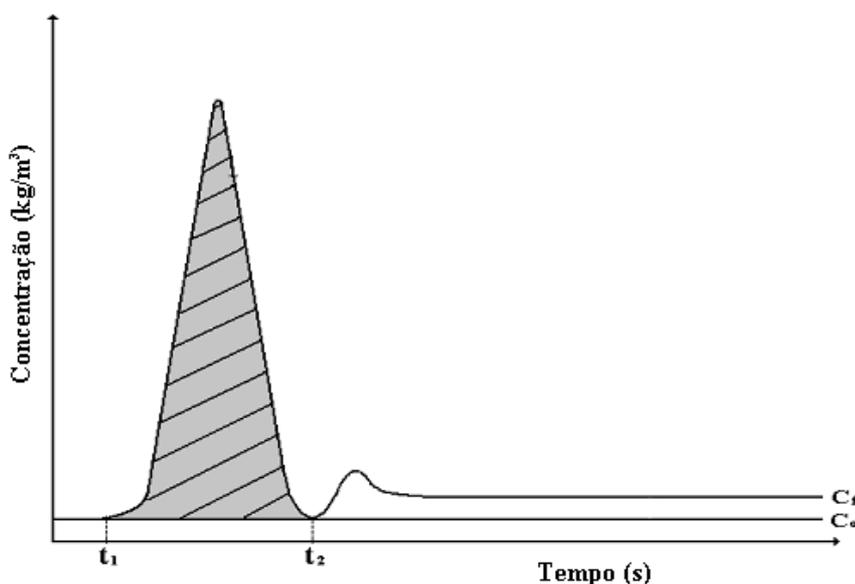


Figura 3 – Curva de distribuição de tempo de homogeneização, de onde são tirados os dados para se calcular a taxa de circulação⁽²⁾.

2.2.2 Taxa de descarburização

O presente estudo visa avaliar a cinética de descarburização no reator RH e o efeito de parâmetros operacionais sobre a cinética de descarburização. Para tal, foi empregada uma reação análoga a descarburização, que é a dessorção de CO₂ de soluções alcalinas.⁽⁵⁾ A soma das vazões de gás na câmara de vácuo e na perna de subida foi mantida constante em 500 litros por minuto, devido a uma limitação na alimentação de gás pelo compressor. A aquisição de dados para obter a taxa de descarburização foi feita através de um medidor de pH, com o sensor de pH situado próximo à perna de subida. Outras localizações do sensor de pH foram testadas sem qualquer diferença em relação às constantes cinéticas da reação de descarburização. O sensor é conectado a uma placa de aquisição de dados, que por sua vez faz interface com o programa de computador, onde os dados de cada ensaio são armazenados e processados.

Após determinar uma curva de calibração relacionando a concentração de CO_{2(aq)} em função do pH, obtém-se um gráfico de concentração de CO_{2(aq)} em função do tempo. Foi assumido que a taxa de dessorção de CO_{2(aq)} pudesse ser expressa pela equação de primeira ordem:



$$-\frac{dC_{CO_2(aq)}}{dt} = K.(C_{CO_2(aq)} - C_{CO_2(aq)}^{eq}) \quad (2)$$

A equação (2) pode ser integrada, obtendo-se a equação (3):

$$-\ln\left(\frac{C_{CO_2(aq)} - C_{CO_2(aq)}^{eq}}{C_{CO_2(aq)}^i - C_{CO_2(aq)}^{eq}}\right) = K.t \quad (3)$$

2.2.3 Tratamento das imagens da câmara de vácuo

A intensidade das reações de descarburização e de desgaseificação, que ocorrem no interior da câmara de vácuo do desgaseificador RH, está diretamente ligada à área de contato metal/gás durante o processo⁽⁶⁾.

Para fazer uma comparação qualitativa da área de contato metal/gás nas diferentes condições de ensaio, foram feitas filmagens dos ensaios.

Para cada condição experimental foram obtidas 10 imagens, que após tratadas foram processadas para determinar a área da pluma no interior da câmara de vácuo. Um programa de domínio público denominado Image J (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) foi utilizado para calcular a área das imagens. O padrão de tratamento das imagens foi escolhido de forma a identificar a área da pluma na câmara de vácuo para todos bicos e vazões.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente será analisado o efeito da injeção de gás na câmara de vácuo sobre a taxa de circulação. Posteriormente, será discutido o efeito desta injeção sobre a constante cinética de descarburização. Finalmente, a variação do coeficiente volumétrico de transferência de massa nas diferentes condições de injeção de gás será analisada, buscando determinar uma condição que otimize a taxa de descarburização.

Inicialmente é importante lembrar que nos ensaios com injeção de gás na câmara de vácuo, a vazão total (perna de subida e câmara de vácuo) foi mantida constante em 500 l/min (medida nas condições padrão: T = 25°C e P = 1 atm).

Para analisar injeção de gás na câmara de vácuo foram traçadas curvas tridimensionais, com o objetivo de se encontrar uma configuração ótima de injeção. Para isso foram considerados os diâmetros dos bicos da perna de subida, a vazões de gás na câmara de vácuo e as taxas de circulação, considerando para todas configurações a vazão total de gás de 500l/min. Para efeito de comparação são apresentados também os dados obtidos por Almeida et al.⁽¹⁾ com injeção de gás apenas na perna de subida. No gráfico estes resultados estão representados pela vazão de 0 l/min na câmara de vácuo, sendo a vazão na perna de subida de 500 l/min.

3.1 Análise dos Resultados da Taxa de Circulação com o Efeito da Injeção na Câmara de Vácuo

A variação da taxa de circulação em função da vazão de gás na câmara de vácuo é apresentada na Figura 4.

Para os resultados apresentados com injeção de gás na câmara de vácuo, a taxa de circulação tendeu a se manter constante a partir de uma determinada vazão máxima. Este mesmo efeito foi observado por outros autores,^(2,3,4) levando em



consideração a injeção apenas na perna de subida. Este efeito pode ser explicado por um maior arraste do líquido pelo gás injetado na perna de subida. Para vazões mais elevadas, a taxa de circulação cai, pois a perna de subida passa a ser ocupada por um grande volume de gás e a quantidade de líquido arrastado tende a diminuir. Foi observado que em alguns casos esse efeito na taxa de circulação culminou com um pico na curva. As taxas de circulação, tanto para os ensaios com ou sem injeção de gás na câmara de vácuo, se elevaram com o aumento dos diâmetros dos bicos de injeção de gás na perna de subida. Enquanto que os diâmetros de bicos na câmara de vácuo não demonstraram grande relevância em relação à taxa de circulação.

Outro fator que se deve considerar é que, com a injeção na câmara de vácuo, o gás foi injetado ao longo de todo o perímetro da perna de subida. O gás injetado nos bicos localizados entre a perna de subida e perna de descida limitou o fluxo na região central da câmara de vácuo causando uma redução na taxa de circulação.

Observa-se também a tendência do aumento da taxa de circulação com o aumento do diâmetro dos bicos de injeção de gás na perna de subida.

A Figura 4 também indica que o diâmetro dos bicos de injeção na câmara de vácuo não apresenta um efeito significativo na taxa de circulação do aço líquido. É interessante observar que com os bicos de 2,2 milímetros possui uma condição de otimização da taxa de circulação. Este valor máximo na taxa de circulação foi obtido com as vazões de 150 l/min e 350 l/min, na câmara de vácuo e na perna de subida, respectivamente.

3.2 Efeito da Injeção de Gás na Câmara de Vácuo na Cinética de Descarburção

A Figura 5 apresenta um gráfico plotado dos dados experimentais baseado na equação (3). Este gráfico indica que os resultados possuem uma boa representação desta equação. O valor da constante cinética da reação K é dada pela inclinação da curva.

A variação da constante cinética de reação K com a vazão de gás na câmara de vácuo para diferentes diâmetros de bicos é mostrado na Figura 6. Exceto para os experimentos com os bicos de diâmetro de 1 milímetro na câmara de vácuo, os resultados para todas as outras configurações dos bicos são muito similares.

Para uma dada vazão, apesar das baixas taxas de circulação, os bicos com pequenos diâmetros tendem a altas taxas de reação. Em quase todos os experimentos os melhores resultados em termos da cinética de reação foram obtidos com bicos com diâmetro de 1,5mm na perna de subida e sem injeção na câmara de vácuo. Quando bicos de 1mm de diâmetro foram usados na câmara de vácuo e na perna de subida, foram obtidas as maiores taxas de reação de descarburção com as vazões de 50l/min e 450l/min nas câmara de vácuo e na perna de subida, respectivamente.

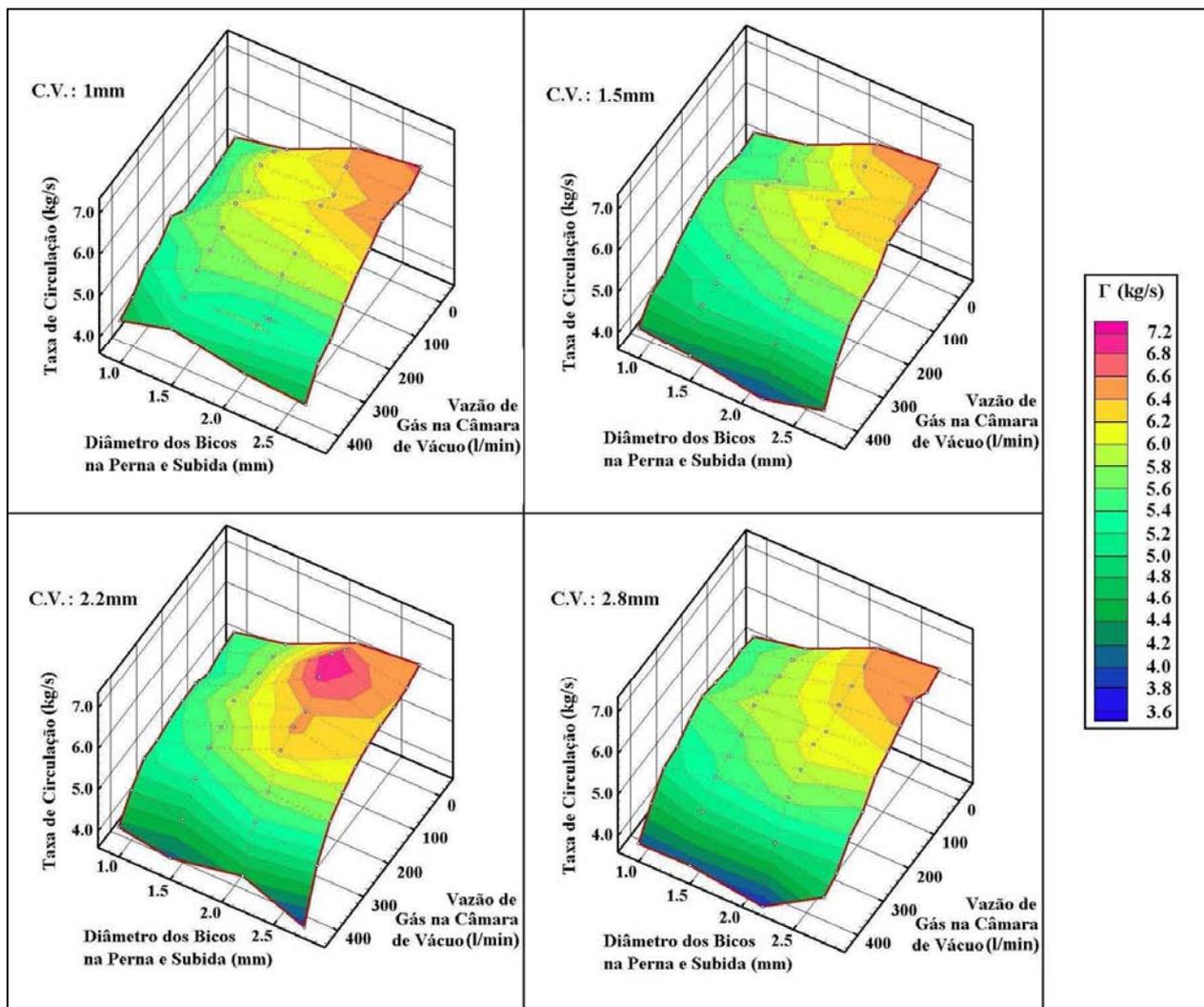


Figura 4 – Variação da taxa de circulação com a vazão de gás na câmara de vácuo para diferentes diâmetros de bicos. C.V. é o diâmetro dos bicos de injeção de gás na câmara de vácuo.

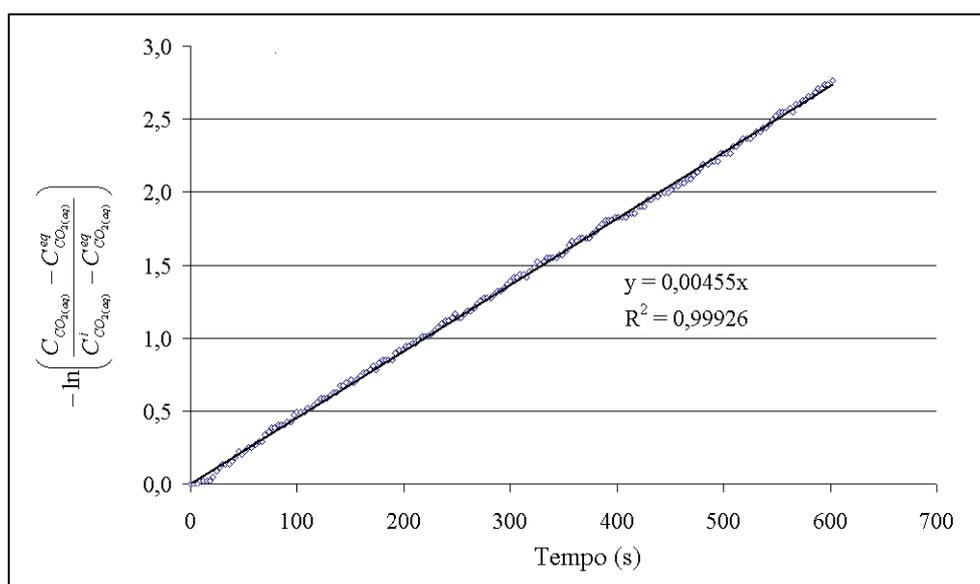


Figura 5 – Gráfico da curva experimental baseado na equação.⁽³⁾

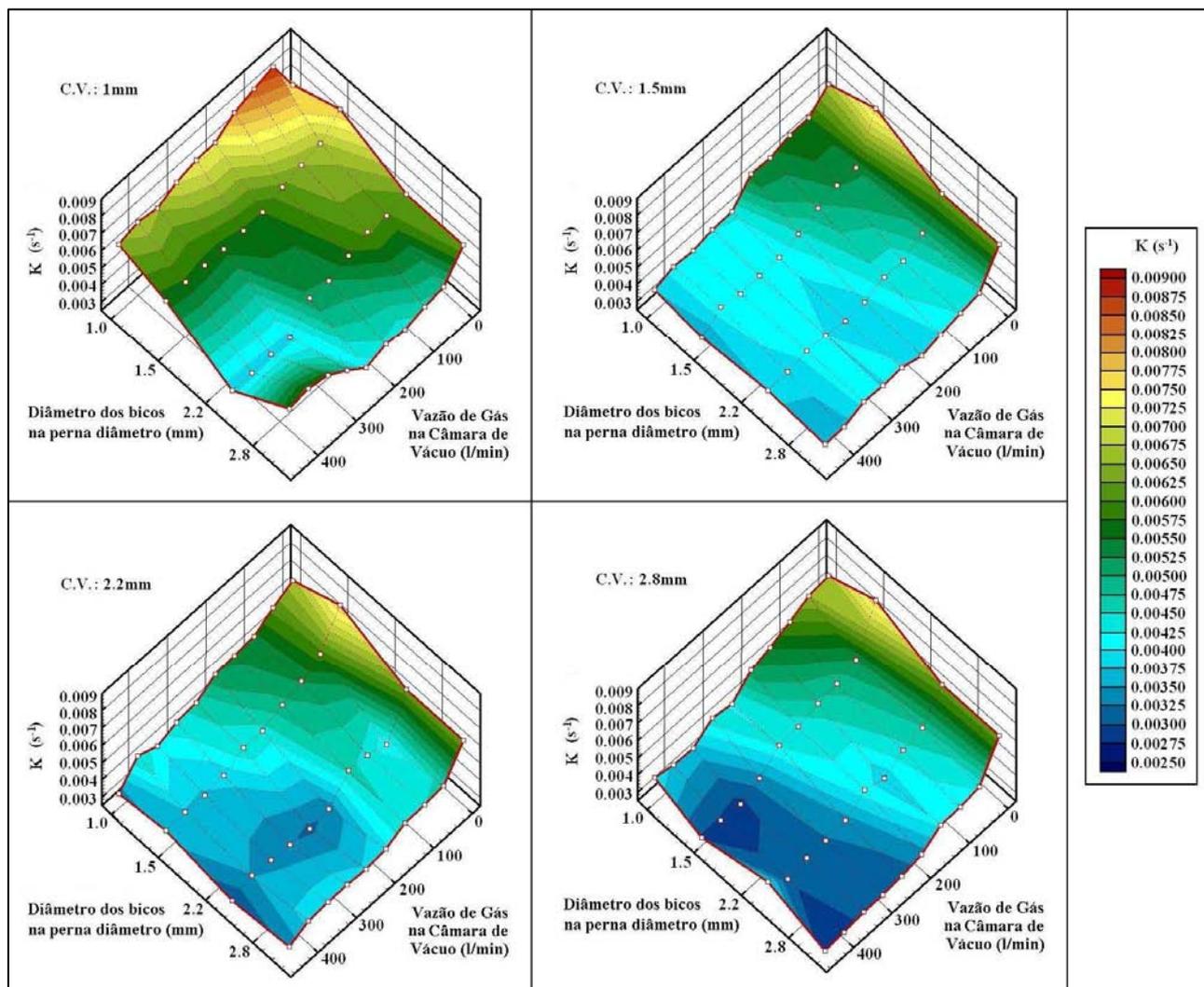


Figura 6 – Variação constante cinética de reação K com a vazão de gás na câmara de vácuo, para diferentes combinações de diâmetros de bicos.

3.3 Coeficiente Volumétrico de Transferência de Massa

Os valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa para a reação de descarburização pode ser estimado pela equação (4), proposta por Yamaguchi et al.⁽⁷⁾

$$K = \frac{1}{W \left(\frac{1}{\Gamma} + \frac{1}{ak \cdot \rho} \right)} \quad (4)$$

Esta equação foi desenvolvida considerando as seguintes suposições:

- a constante cinética da reação é controlada pela transferência de massa no líquido;
- o líquido é perfeitamente misturado na panela e na câmara de vácuo; e
- a quantidade de líquido na panela é maior que na câmara de vácuo.

Todas estas suposições são razoáveis nas condições adotadas na presente investigação. A primeira suposição é válida quando a concentração é menor que 200 ppm.⁽⁷⁾ Os valores do coeficientes ak , calculados de acordo com a equação (4) são mostrados na Figura 7.

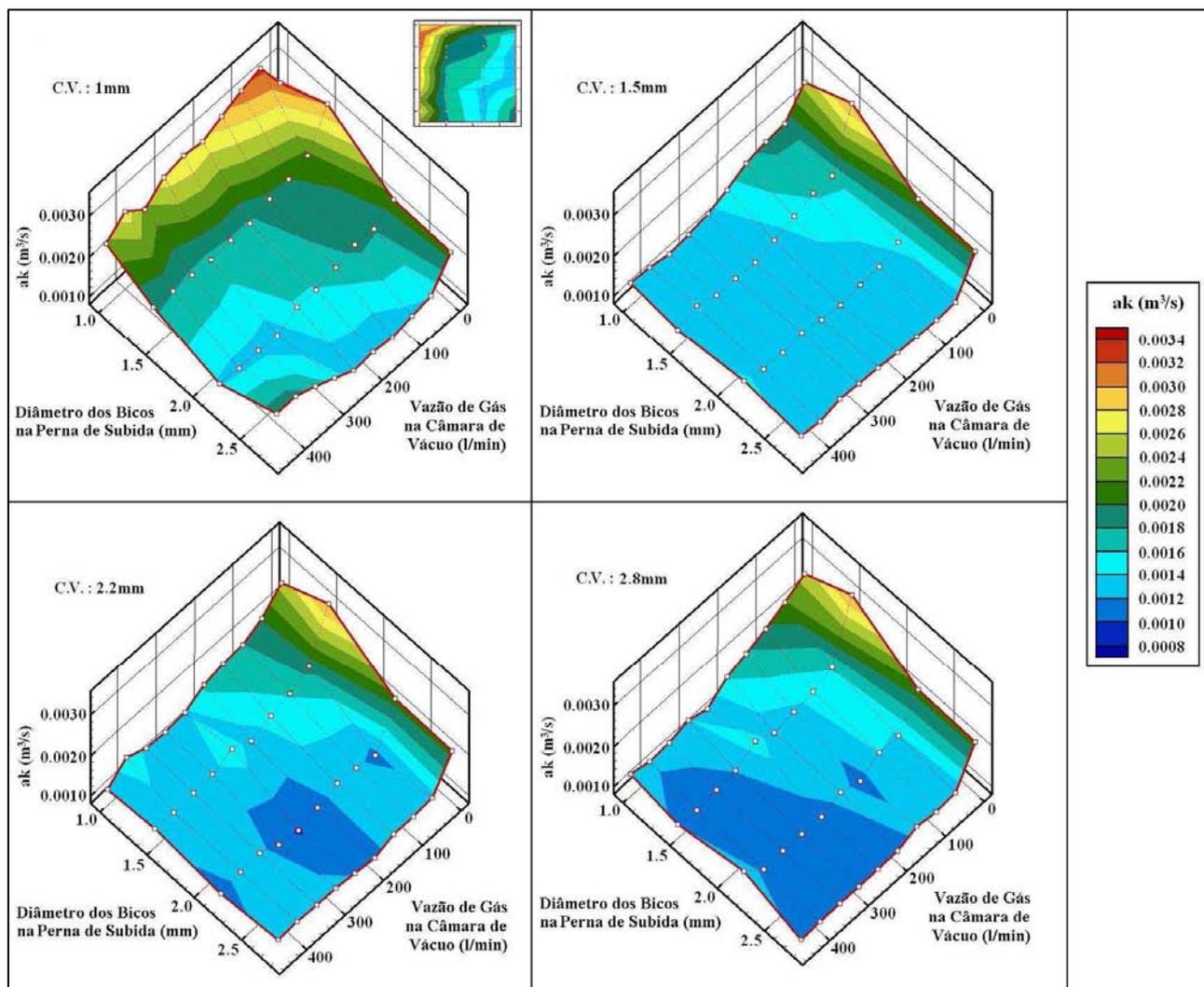


Figura 7 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa para diferentes configurações de bicos e vazões de gás na câmara de vácuo.

A tendência observada na Figura 7 é muito similar à observada na Figura 6. O melhor resultado em termos do coeficiente volumétrico de massa foi obtido com bicos de diâmetro de 1 mm e vazão de 50 l/min na câmara de vácuo e 450 l/min na perna de subida. O coeficiente volumétrico de transferência de massa foi então plotado em função da área relativa da pluma na câmara de vácuo, estimado pelas análises das imagens. Os resultados são apresentados na Figura 8.

Apesar da dispersão dos pontos observados na Figura 8, há uma clara tendência do coeficiente volumétrico de transferência de massa aumentar quando a área da pluma aumenta. Estes resultados indicam que com os maiores resultados das taxas de descarburização são alcançados quando se aumenta a área da pluma. O efeito da taxa de circulação na cinética de descarburização é secundário. Na presente investigação, os melhores resultados em termos da taxa de descarburização foram obtidos com baixas taxas de circulação mas com alta área da pluma. Esta evidência contradiz a crença comum que com o aumento da taxa de circulação, necessariamente, leva a uma rápida descarburização.

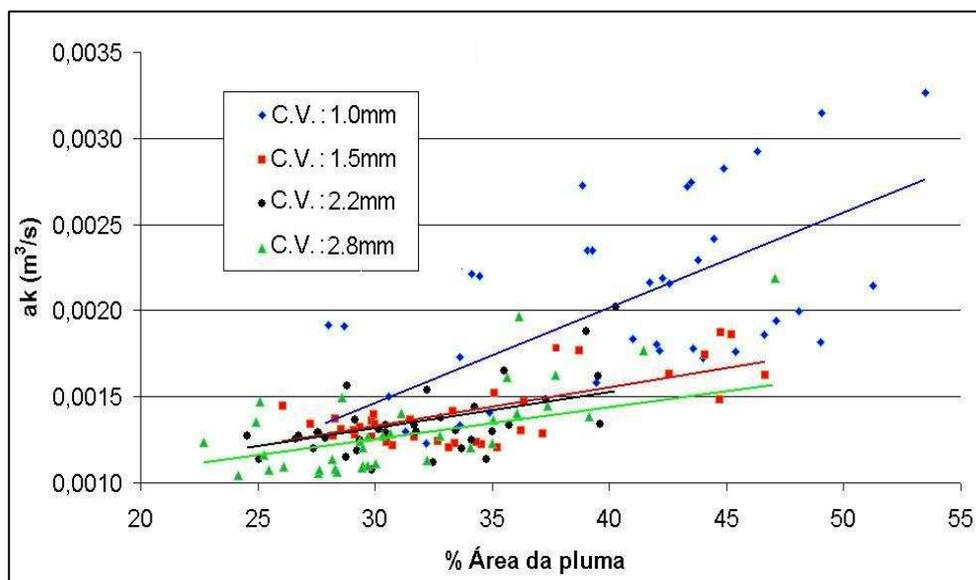


Figura 8 – Variação do coeficiente volumétrico de transferência de massa com a área relativa da pluma na câmara de vácuo.

4 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

No presente artigo, um modelo físico foi utilizado para estudar a taxa de circulação e da cinética de descarburização em um desgaseificador RH. Os efeitos da injeção de gás na câmara de vácuo e dos diâmetros dos bicos usados na injeção de gás foram investigados. Em todos os experimentos, a vazão total de gás foi mantido constante em STP 500 l/min. A descarburização de aço líquido foi simulada utilizando reação de dessorção de CO₂ a partir de soluções cáusticas.

Os resultados mostraram que a taxa de circulação aumenta com o aumento do diâmetro dos bicos e diminuiu quando o gás é injetado na câmara de vácuo.

A cinética da reação segue uma equação de primeira ordem e é controlada pela transferência de massa na fase líquida. A reação foi afetada pela vazão do gás e os diâmetros dos bicos. Um aumento no fluxo do gás na câmara de vácuo tende a reduzir a taxa de descarburização. Esta tendência foi observada para todos as combinações de bicos, exceto quando os bicos com 1 milímetro de diâmetro foram utilizados. Neste caso, o melhor resultado foi alcançado com o fluxo do gás de 50 STP l/min, na câmara de vácuo e 450 l/min na perna de subida.

O coeficiente volumétrico de transferência de massa foi calculado com base na constante cinética de reação e na taxa de circulação. A variação do coeficiente volumétrico de transferência de massa com a vazão do gás e as configurações dos bicos foi muito similar com a observada na constante cinética de reação.

Foi observado que o coeficiente volumétrico de transferência de massa apresentou uma clara tendência a aumentar, quando a área relativa da pluma na câmara de vácuo aumentou.

Os resultados obtidos no presente estudo contradizem a crença comum de que o aumento da taxa de descarburização é devido apenas ao aumento da taxa de circulação. Sendo a taxa de descarburização também dependente do coeficiente volumétrico de transferência de massa.



NOMENCLATURA

Γ = circulation rate ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$);

V = volume de água na panela (l);

W = massa de água na panela (kg);

ΔC = variação da concentração de traçador na panela ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

A = área abaixo da curva ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$);

K = constante cinética da reação (s^{-1});

t = tempo (s);

$C_{\text{CO}_2(\text{aq})}$ = concentração de CO_2 aquoso na panela (mg/l);

$C^{\text{eq}}_{\text{CO}_2(\text{aq})}$ = concentração de CO_2 aquoso na panela no equilíbrio (mg/l).

ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)

$\rho_{\text{água}}$ = densidade da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Agradecimentos

Os autores são gratos pelo apoio financeiro da FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Processo n^o TCE APQ - 1895-5.7/07) e do apoio da CAPES e CNPq – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, sob a forma de bolsas.

REFERÊNCIAS

- 1 Seshadri, V., Costa, S.L.S., Cold Model of RH Degassing, Transactions of ISIJ, Vol.26, p.133-138,1986.
- 2 Almeida, A.T.P., Alvarenga, J.A., Belarmino, T.J.P., Cardoso, A.C.P., Nascimento, A.A., Tavares, R. P., et al., Physical Modeling of Vacuum Decarburization in an RH Degasser, AISTech 2006 Proceedings, Vol. 1, 2006, 761-770.
- 3 Vargas, G.A. e Tavares, R. P., Modelagem Matemática e Física Do Desgaseificador a Vácuo RH da Companhia Siderúrgica Tubarão – CST, Dissertação de Mestrado, junho, 2000.
- 4 Silva, C. A., Silva, I. A., Martins E. M. C., Seshadri, V., Perim, C. A., e Filho, G. A. V. Fluxo do fluido e características de mistura no desgaseificador RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão, e a influência da injeção de gás no fundo e plugue poroso pelo estudo do modelo físico, Ironmaking Steel making, 2004, vol 31, n^o1.
- 5 Guo, D. & Irons, G.A., Modeling of Gas-Liquid Reactions in Ladle Metallurgy: Part I. Physical Modeling – Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 31, p 1447-1455, 2000.
- 6 Kishimoto, Y., Yamaguchi, K., Sakuraya, T. and Fujii, T., Decarburization Reaction in Ultra-Low Carbon Iron Melt under Reduced Pressure, ISIJ International, vol. 33 (1993), n^o3, p. 391-399.
- 7 Yamaguchi, K., Kishimoto, Y., Saruraya, T., Fujii, T., Aratani, M. & Nishikawa, H., Effect of Refining Conditions for Ultra Low Carbon Steel on Decarburization Reaction in RH Degasser, ISIJ International, Vol. 32, N^o1, p. 126-135, 1992.