

SIMULAÇÃO FÍSICA DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS E DA DESCARBURAÇÃO EM DESGASEIFICADORES RH¹

André Afonso do Nascimento²
Henrique Loures Vale Pujatti²
Roberto Parreiras Tavares³

Resumo

A demanda por aços com baixas concentrações de nitrogênio, hidrogênio e carbono tem crescido ultimamente. O processo RH é um processo de refino secundário que permite a obtenção simultânea de elevados índices de remoção destes elementos do aço líquido. Neste processo, a taxa de circulação do aço tem efeito significativo sobre a produtividade do equipamento, uma vez que afeta a taxa de descarburização. Neste trabalho, um modelo físico de um desgaseificador RH foi construído e usado para estudar a taxa de circulação e a cinética de descarburização. Os efeitos da vazão de gás e da configuração do sistema usado na sua injeção foram analisados. A reação de descarburização foi simulada através da reação de dessorção de CO₂ de soluções aquosas de hidróxido de sódio. A concentração de CO₂ na solução foi avaliada através de medidas de pH. Os resultados experimentais indicaram que a cinética de descarburização pode ser descrita através de uma equação de primeira ordem, com controle por difusão de massa no líquido. A partir dos resultados obtidos foi possível estimar as contribuições relativas da descarburização na perna de subida do RH e no vaso de vácuo.

Palavras-chave: Modelamento físico; Desgaseificador RH; Taxa de circulação; Cinética de descarburização

PHYSICAL SIMULATIONS OF FLUID FLOW AND DECARBURIZATION IN A RH DEGASSER

Abstract

Steels with low concentrations of nitrogen, hydrogen and carbon have been 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 the 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 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 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 kinetics of decarburization can be described by a first order equation. Based on the results, it was possible to determine the contributions of the decarburization in the upleg snorkel and in the vacuum vessel.

Key words: RH degasser; Circulation rate; Decarburization rate; Physical modeling

¹ *Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG*

³ *Sócio da ABM, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFMG.*

1 INTRODUÇÃO

O processo RH é um processo de refino secundário dos aços, que permite a obtenção de baixíssimos teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio no aço líquido. Neste processo, as taxas de circulação e de descarburização têm um efeito relevante sobre a produtividade do equipamento. Em trabalhos anteriores, a taxa de circulação do aço no reator RH foi avaliada através de modelamento matemático⁽¹⁻²⁾, modelamento físico⁽³⁻⁵⁾ e também através de dados obtidos diretamente no equipamento industrial⁽⁶⁻⁷⁾. Os efeitos de diferentes parâmetros, como vazão de argônio, diâmetro das pernas, pressão na câmara de vácuo e posição dos pontos de injeção de argônio, sobre a taxa de circulação foram analisados nestas investigações.

A taxa de descarburização no processo RH tem também sido investigada usando dados obtidos nas unidades industriais⁽⁸⁻¹¹⁾, experimentos a quente em laboratórios^(8,10) e modelos em água^(8,12). Modelos matemáticos para a cinética de descarburização têm também sido propostos⁽¹¹⁾. A baixas concentrações de carbono, a cinética da descarburização é controlada pela transferência de massa do carbono e uma equação de primeira ordem tem sido usada para descrever a taxa de descarburização^(8-9,11).

Neste trabalho, as taxas de circulação e descarburização do aço no processo RH foram estudadas usando modelamento físico. Os efeitos da taxa de injeção de gás e da configuração dos bicos de injeção foram analisados. A descarburização do aço líquido foi simulada usando a dessorção de CO₂ de soluções aquosas de hidróxido de sódio.

2 METODOLOGIA

Os experimentos com o modelo físico foram divididos em duas partes, uma para avaliação da taxa de circulação e outra para determinação da taxa de descarburização. Os experimentos desenvolvidos serão descritos abaixo, após uma descrição do modelo físico e do aparato experimental.

2.1 Aparato Experimental

O modelo físico do desgaseificador RH usado neste trabalho é mostrado na Figura 1.

A Tabela 1 apresenta as principais características do modelo físico e do sistema de injeção de gás. O modelo físico foi construído em escala 1:5 em relação a um equipamento industrial.

A Figura 2 apresenta uma vista esquemática do aparato experimental.

Nos experimentos desenvolvidos, ar ao invés de argônio foi injetado na perna de subida. Este ar foi fornecido através de um compressor. A vazão de ar foi medida através de um medidor de vazão mássica e controlada manualmente. Não foi feita medida individual de vazão para cada um dos bicos injetores. Para garantir que o ar estava sendo distribuído uniformemente para os diversos bicos, ele foi injetado primeiramente na parte central de uma câmara, que estava conectada aos bicos através de mangueiras de mesmo diâmetro e comprimento.

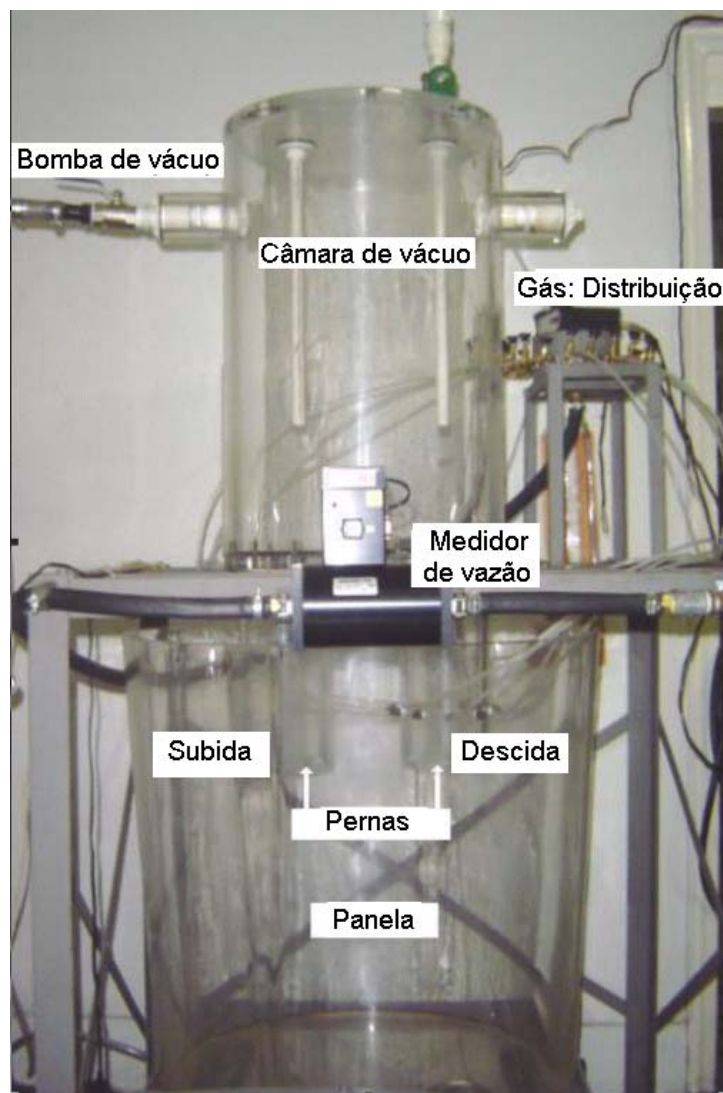


Figura 1- Vista do modelo físico do desgaseificador RH.

A pressão na câmara de vácuo foi controlada através de um sistema de válvulas e monitorada por um manômetro.

Os níveis de água na panela e na câmara de vácuo foram controladas e mantidas constantes em todos os experimentos.

2.2-Avaliação da Taxa de Circulação

O método utilizado por Seshadri e Costa⁽¹²⁾ foi adotado para determinação da taxa de circulação. Neste método, uma solução de cloreto de potássio é injetada na perna de subida na forma de um pulso. A variação da concentração do sal na perna de descida é, então, monitorada continuamente. A concentração de KCl é determinada através da variação da condutividade elétrica da água, usando uma curva de calibração obtida previamente.

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

Parâmetros	Valor
Panela: - diâmetro superior(m) - diâmetro inferior (m) - altura (m) - nível de líquido (m)	0,720 0,648 0,750 0,655
Câmara de vácuo: - diâmetro (m) - altura (m) - nível de líquido (m) - pressão relativa (Pa)	0,415 0,700 0,090 - 2700
Pernas: - comprimento (m): - diâmetro (m) - profundidade de imersão (m) - distância entre centros (m)	0,312 0,120 0,120 0,300
Injeção de gás: - vazão (l/min – condições padrão) - bicos de injeção: - número - diâmetros (mm) - posição (acima do nível de líquido) (m)	50 – 500 10 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,8 0,04

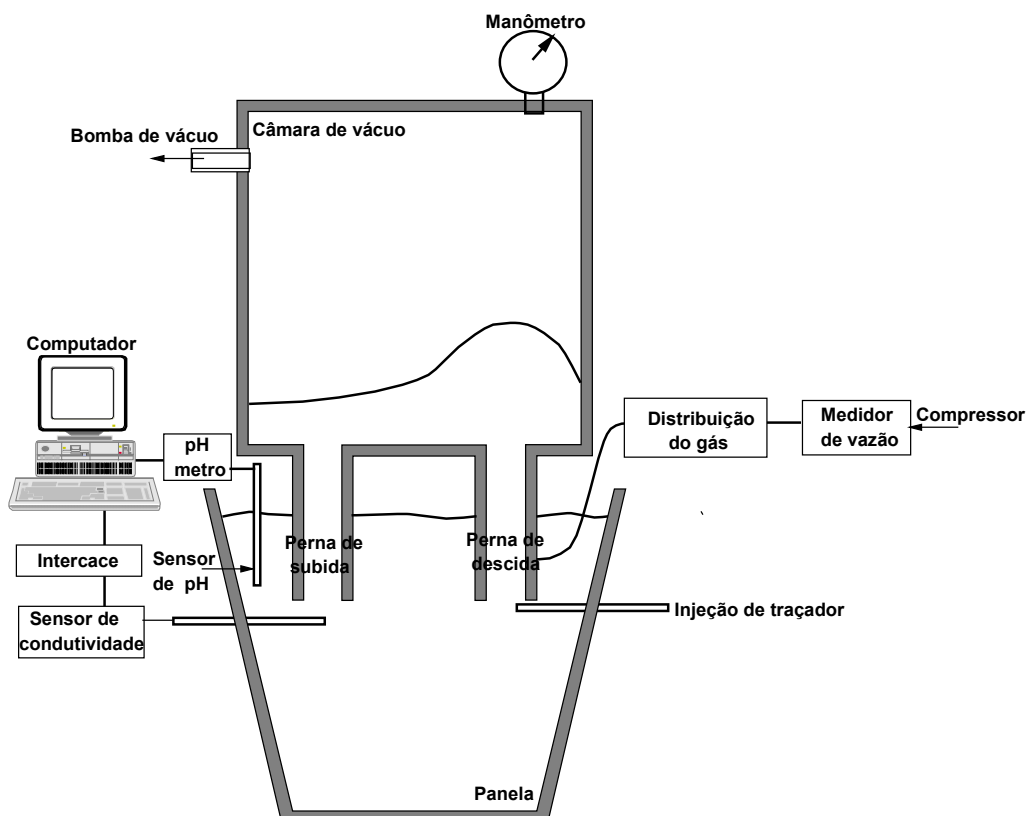


Figura 2- Vista esquemática do aparato experimental.

A Figura 3 ilustra curvas típicas de variação de concentração de sal na perna de descida em função do tempo. A taxa de circulação foi estimada através da seguinte equação:

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

onde Γ é a taxa de circulação (kg/s); V é o volume de água na panela (m^3); A é a área debaixo da curva durante o primeiro pico ($kg.s/m^3$) (Figura 3); ΔC é a variação de concentração de KCl na panela no final do experimento (kg/m^3); ρ é a densidade do fluido circulante (água) (kg/m^3).

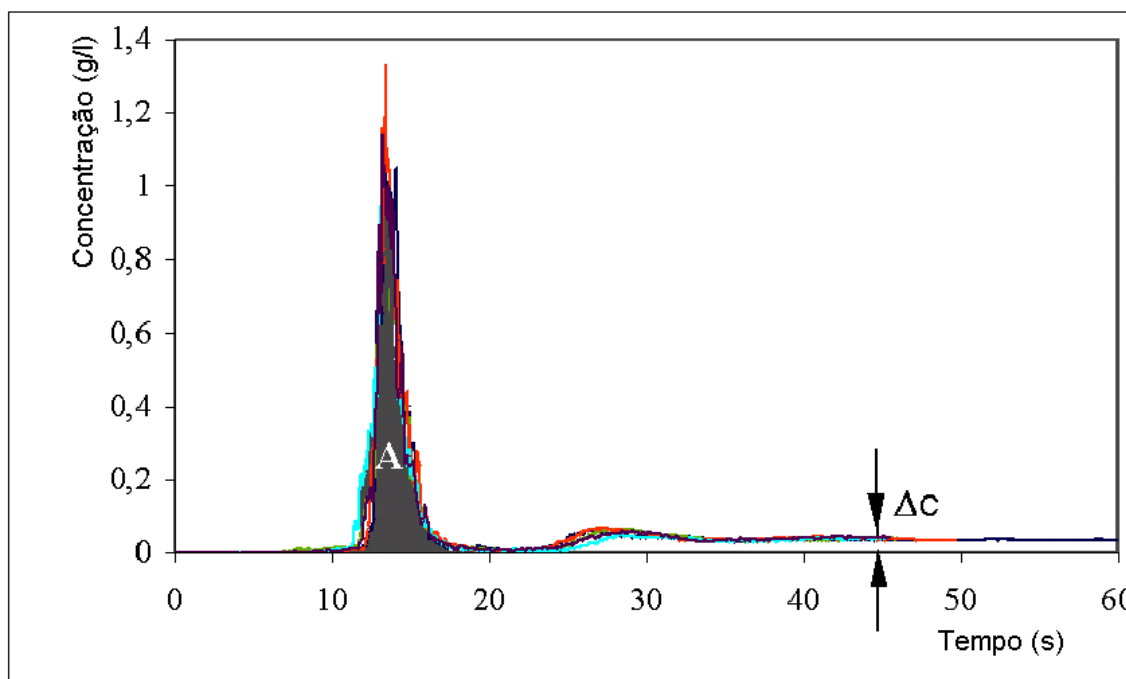


Figura 3- Curvas obtidas nos experimentos de avaliação de taxa de circulação.

Para cada condição experimental, foram realizados dez experimentos. O balanço de massa do KCl foi verificado em todos os ensaios.

2.3 Avaliação da Taxa de Descarburção

A dessorção de CO_2 de soluções de hidróxido de sódio foi usada para simular a reação de descarburção do aço líquido⁽¹³⁾. Nestes experimentos, CO_2 foi injetado numa solução aquosa de hidróxido de sódio (0,01 g.mol/l), contida na panela do modelo físico, até que fosse alcançado o pH de aproximadamente 6,5. Neste ponto, a operação do modelo físico era iniciada com a injeção de ar na perna de subida. Esta injeção provoca a dessorção do CO_2 e leva a um aumento do pH. A variação do pH foi monitorada durante todo o ensaio a uma taxa de 0,33 Hz. Uma curva de calibração foi empregada para converter os valores de pH em concentração de CO_2 . Vazões de ar na faixa de 50 a 500 l/min (condições padrão) foram usadas. Bicos com diâmetros de orifício de 1, 1,5, 2 e 2,8 mm foram utilizados nas simulações. As demais condições foram mantidas constantes em todos os ensaios. Para cada condição experimental, três testes foram realizados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Taxa de Circulação

A variação da taxa de circulação em função da vazão de gás para os diferentes diâmetros dos bicos de injeção é apresentada na Figura 4. Para um dado diâmetro do bico, há uma tendência de aumento da taxa de circulação com o aumento da vazão de gás. Entretanto, acima de um certo valor de vazão, a taxa de circulação tende a permanecer aproximadamente constante ou até decrescer. Este tipo de comportamento foi observado em outras publicações^(2,4,12).

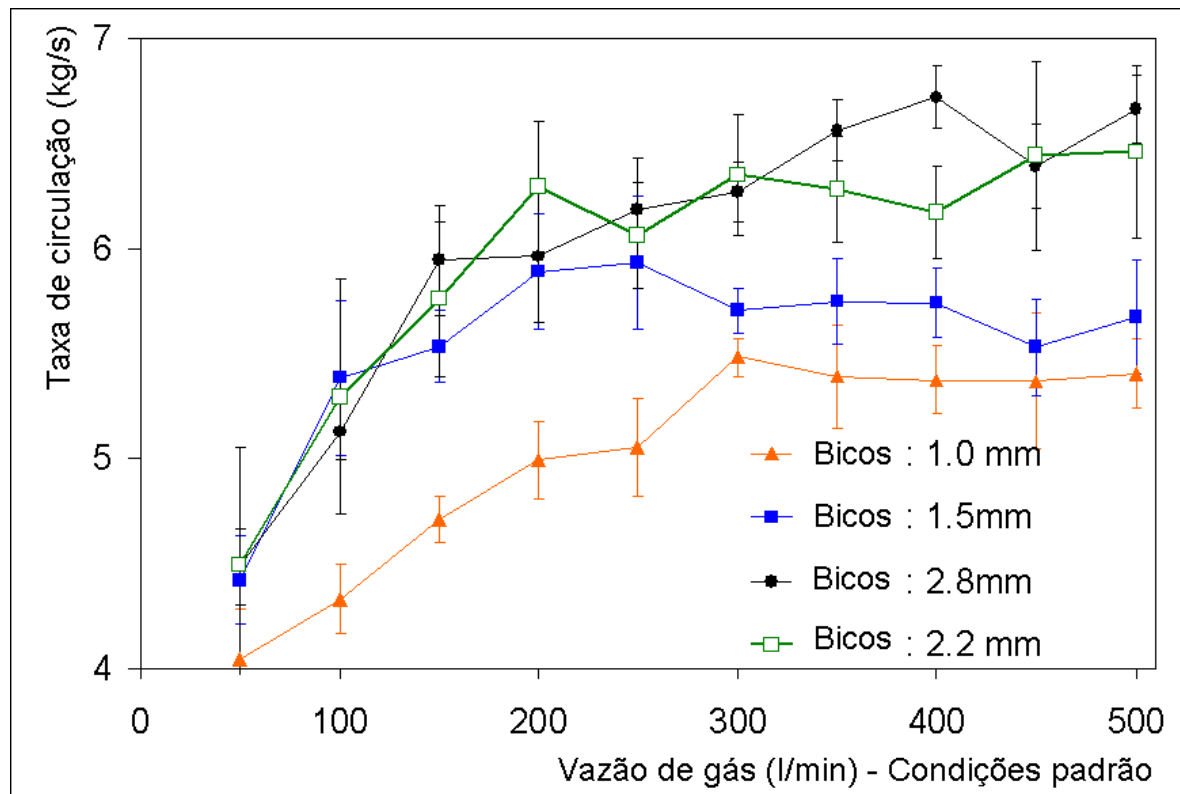


Figura 4- Variação da taxa de circulação com a vazão de gás e com o diâmetro dos bicos de injeção.

Para uma mesma vazão, um aumento no diâmetro dos bicos de injeção tende a aumentar a taxa de circulação. De acordo com Park et alii⁽²⁾, este efeito pode ser analisado considerando a variação da área da pluma formada na perna de subida. A Figura 5 compara imagens da seção transversal da perna de subida durante a injeção de gás, para diferentes vazões de gás e diâmetros dos bicos. Nestas imagens, as áreas escuras correspondem à pluma. Para a mesma vazão, a pluma tende a ser maior para os bicos de 2,8 mm. Com bicos de 1 mm, a pluma tende a se concentrar na região central da perna, deixando uma área próxima à parede da perna praticamente sem gás. Esta tendência é gradualmente alterada quando o diâmetro do bico aumenta. Para os bicos de 2,8 mm, a pluma está mais uniformemente distribuída ao longo da seção transversal da perna, particularmente para as maiores vazões. Uma pequena área sem gás pode ser observada na região central da perna para baixas vazões.

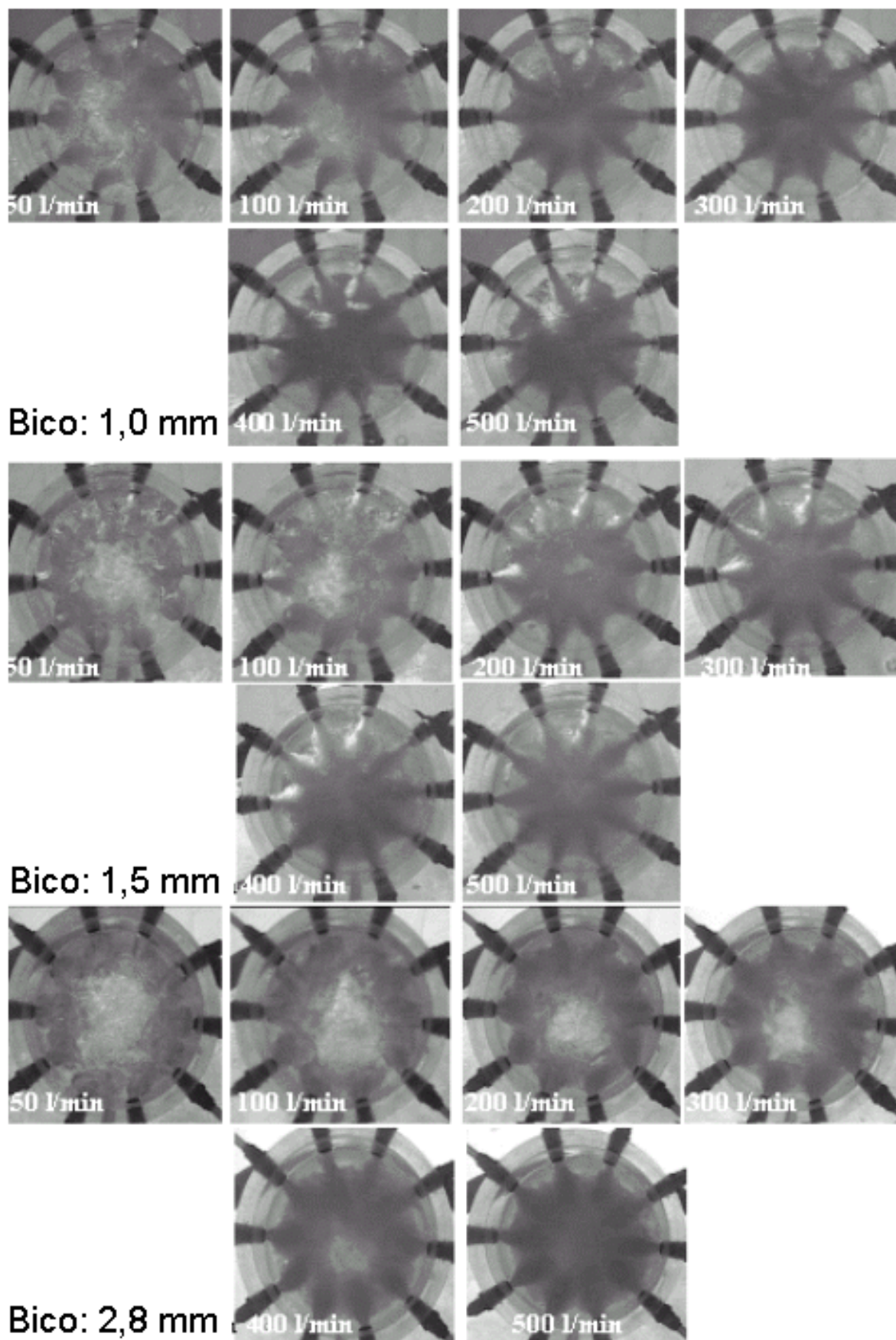


Figura 5- Seção transversal da perna de subida durante a injeção de gás para diferentes vazões de gás e diâmetros de bicos.

3.2 Taxa de Descarburaco

De acordo com o modelo proposto por Yamaguchi et alii⁽⁹⁾, a variao da concentrao de CO₂ aquoso durante um experimento de simulao de descarburaco pode ser expresso pela seguinte equao de primeira ordem:

$$-\frac{dC_{CO_2_{aq}}}{dt} = K(C_{CO_2_{aq}} - C_{CO_2_{aq}}^{eq}) \quad (2)$$

onde C_{CO₂ aq} é a concentrao de CO₂ aquoso na panela (mg/l), t é o tempo (s), K é a constante cinética de reao (s⁻¹), C^{eq}_{CO₂ aq} é a concentrao de equilíbro do CO₂ aquoso com a fase gasosa.

Neste modelo, a constante cinética de reao é dada por:

$$K = \frac{I}{W \left(\frac{I}{\Gamma} + \frac{1}{ak_c \rho} \right)} \quad (3)$$

onde W é a massa de água na panela (kg), Γ é a taxa de circulao (kg/s), a é área de reao (m²), k_c é o coeficiente de transferncia de massa (m/s), ρ é a densidade da água (kg/m³).

As hipteses feitas no desenvolvimento deste modelo so:

- a reao é controlada por transferncia de massa no líquido;
- o líquido está perfeitamente misturado na panela e na câmara de vácuo;
- a quantidade de líquido na panela é muito superior à que está na câmara de vácuo.

Estas hipteses se aplicam às condioes que prevalecem nos testes desenvolvidos.

A equao (2) pode ser integrada para fornecer:

$$-\ln \frac{(C_{CO_2_{aq}} - C_{CO_2_{aq}}^{eq})}{(C_{CO_2_{aq}}^i - C_{CO_2_{aq}}^{eq})} = K.t \quad (4)$$

onde Cⁱ_{CO₂ aq} é a concentrao inicial do CO₂ aquoso.

Os resultados experimentais foram tratados de acordo com a equao (4). Alguns dos resultados obtidos so apresentados na Figura 6, onde se constata o bom ajuste dos dados à equao de cinética de primeira ordem. O valor de K pode ser obtido a partir da inclinao das linhas. A variao de K com a vazo de gás, para os diferentes diâmetros dos bicos, é mostrada na Figura 7. Para uma dada vazo, apesar de fornecer taxas de circulao menores, os bicos de menor diâmetro levam a taxas de descarburaco mais elevadas.

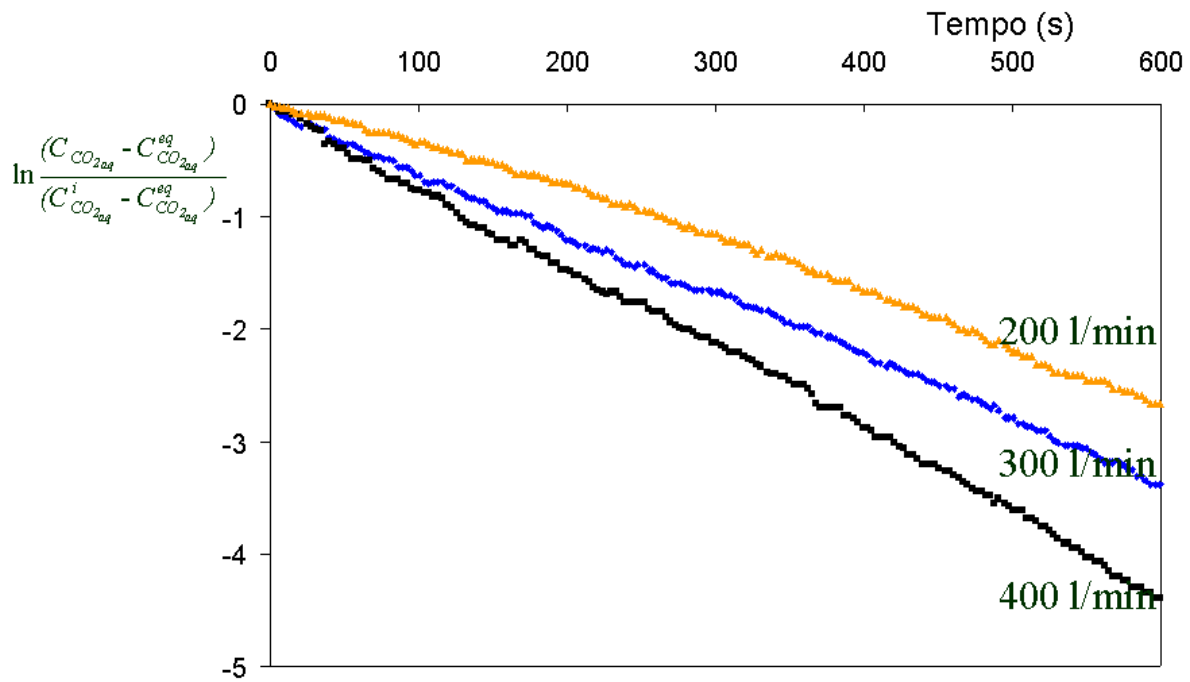


Figura 6- Resultados experimentais expressos em termos da equação de cinética de primeira ordem (equação 4).

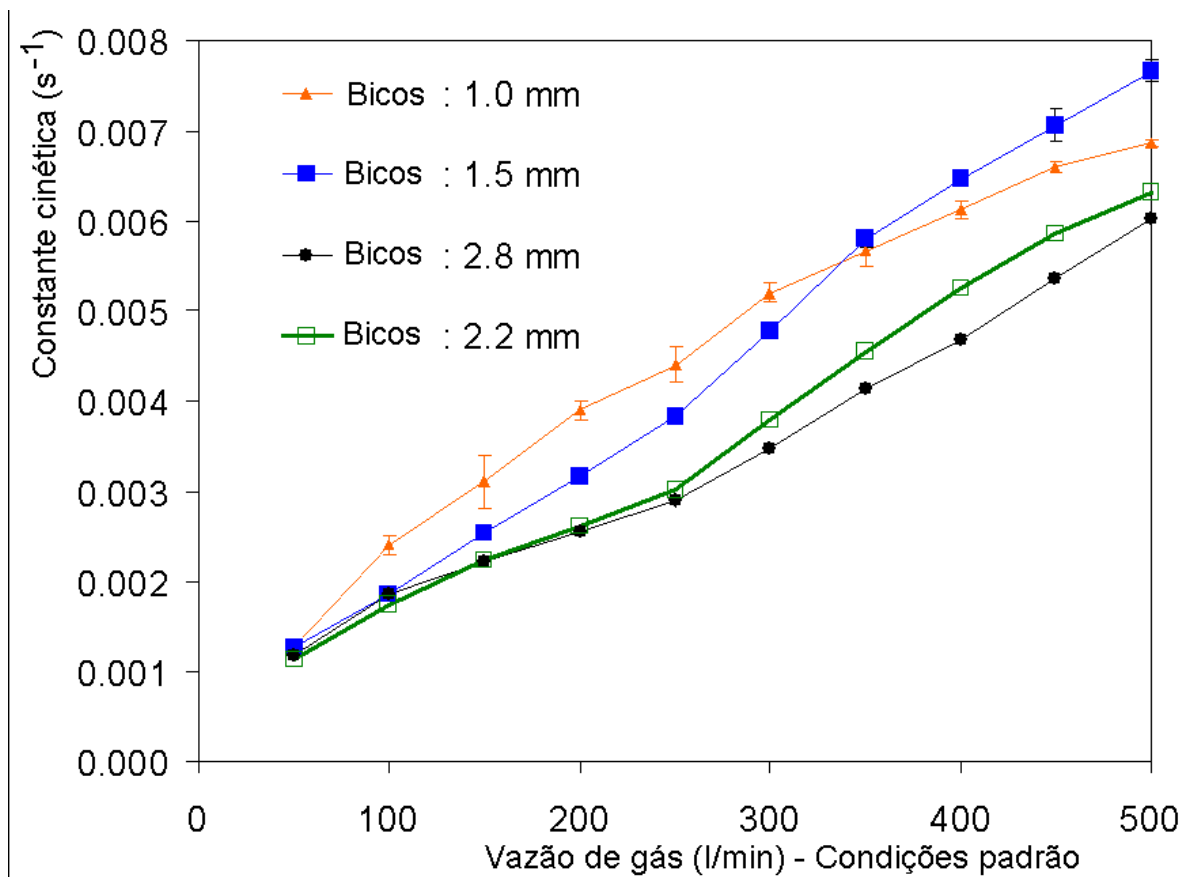


Figura 7- Variação da constante cinética de descarburização com a vazão de gás e com o diâmetro dos bicos.

O produto $a.k_c$ representa o coeficiente volumétrico de transferência de massa e pode ser estimado a partir da equação (3). A figura 8 apresenta os valores do

coeficiente volumétrico de transferência de massa em função do número de Reynolds no bico de injeção. Para números de Reynolds de até 15000 aproximadamente, o efeito do diâmetro dos bicos é pequeno e há uma dependência linear do coeficiente de transferência de massa com o número de Reynolds. Para números de Reynolds superiores a 15000, a tendência linear permanece, mas há um aumento na inclinação das linhas. Este aumento é diferente para cada diâmetro de bico, sendo mais relevante para os bicos de maior diâmetro.

O comportamento visto na Figura 8 pode ser analisado considerando que há dois sítios de reação. A relevância de cada sítio varia de acordo com o número de Reynolds. Para os bicos de 1 mm, o jato proveniente do bico se rompe em pequenas bolhas, com grande área superficial. Neste caso, a perna de subida é um sítio bastante relevante para ocorrência da reação de descarburização, mesmo quando o *splash* na câmara de vácuo é pronunciado. Para os bicos de maior diâmetro, especialmente o de 2,8 mm, o efeito do *splash* se torna mais relevante a números de Reynolds mais elevados. Este efeito é o responsável pelo aumento na inclinação das linhas observado na figura 8.

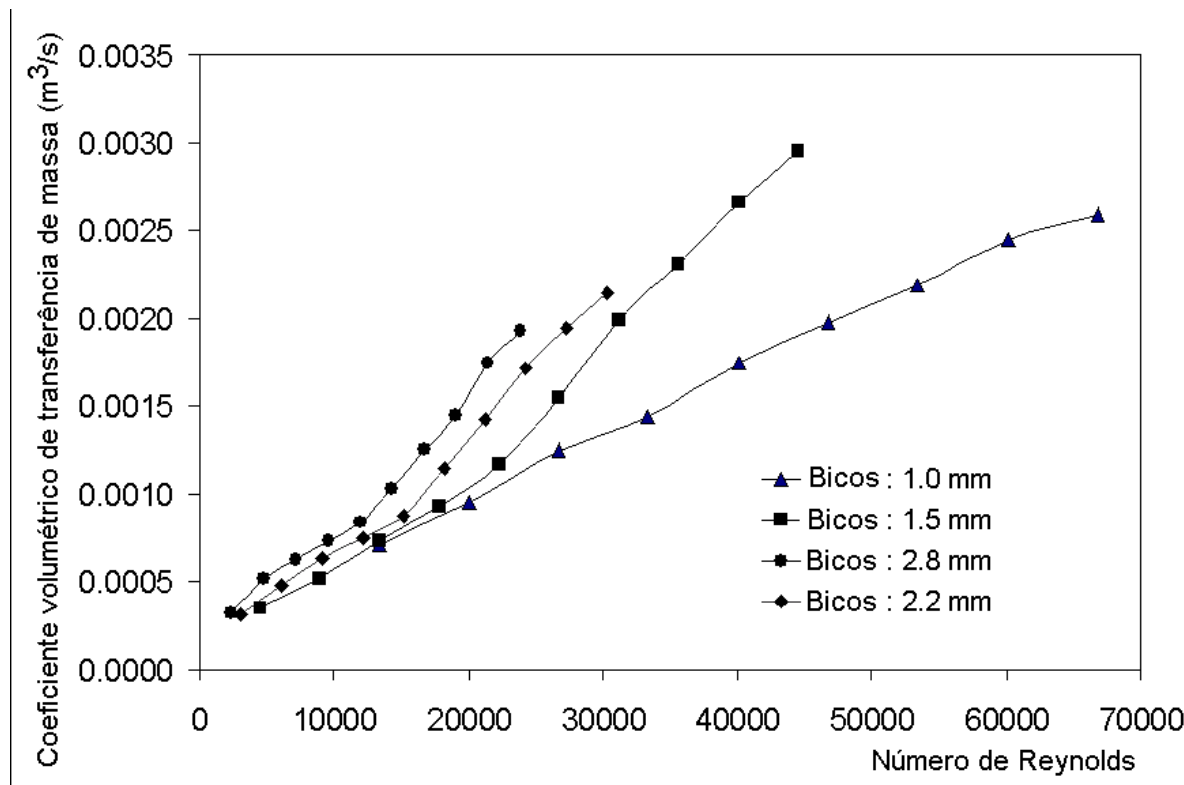


Figura 8- Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função do número de Reynolds no bico de injeção.

4 CONCLUSÕES

Um modelo físico de um desgaseificador RH foi construído e utilizado para estudar as taxas de circulação e descarburização do aço líquido.

Os resultados indicaram que a taxa de circulação aumenta com o aumento da vazão de gás e com o diâmetro dos bicos de injeção. O efeito da vazão de gás se torna menos relevante em vazões mais elevadas.

A cinética de descarburização segue uma equação de primeira ordem com controle pela transferência de massa na fase líquida. Um aumento na vazão de gás provoca aceleração da reação. Para uma dada vazão, os bicos de menor diâmetro levam a

taxas de descarburização mais elevadas. Uma relação linear entre o coeficiente volumétrico de transferência de massa e o número de Reynolds no bico foi obtida. A inclinação da linha reta varia de acordo com a relevância dos sítios de descarburização. Em altos números de Reynolds, a descarburização na câmara de vácuo tende a se tornar mais relevante.

REFERÊNCIAS

- 1 Y-G. Park et al., "Numerical Calculation of Circulation Flow Rate in the Degassing Rheinstahl-Heraeus Process", *ISIJ International*, 40 (8) (2000), 749-755.
- 2 Y-G. Park et al., "The Effect of Operating Parameters and Dimensions of the RH System on Melt Circulation Using Numerical Calculations", *ISIJ International*, 41 (5) (2001), 403-409.
- 3 C. Kamata et al, "Cold Model Experiments on the Circulation Flow in RH Reactor Using a Laser Doppler Velocimeter", *1998 Steelmaking Conference Proceedings*, (1998), 609-616.
- 4 V. Seshadri, S.L.S. Costa, "Cold Model Studies of RH Degassing Process", *Transactions of ISIJ*, 26 (2) (1986), 133-138.
- 5 K. Nakanishi, J. Szekely and C.W. Chang, "Experimental and Theoretical Investigation of Mixing Phenomena in the RH-Vacuum Process", *Iron & Steelmaking*, 2 (2) (1975), 115-124.
- 6 H. Kondo et al, "Comprehensive refining process by the Q-BOP-RH Route for Production of Ultra-Low Carbon Steel", *Iron & Steelmaker*, 16 (10) (1989), 34-38.
- 7 T. Kuwabara et al, "Investigation of Decarburization Behavior in RH-Reactor and its Operation Improvement", *Transactions of ISIJ*, 28 (4) (1988), 305-314.
- 8 S. Inoue et al, "Acceleration of Decarburization in RH Vacuum Degassing Process", *ISIJ International*, 32 (1) (1992), 120-125.
- 9 K. Yamaguchi et al, "Effect of Refining Conditions for Ultra Low Carbon Steel on Decarburization Reaction in RH Degasser", *ISIJ International*, 32 (1) (1992), 126-135.
- 10 Y. Kishimoto et al, "Decarburization Reaction in Ultra-Low Carbon Iron Melt Under Reduced Pressure", *ISIJ International*, 33 (3) (1993), 391-399.
- 11 M. Takahashi, H. Matsumoto and T. Saito, "Mechanism of Decarburization in RH Degasser", *ISIJ International*, 35 (12) (1995), 1452-1458.
- 12 V. Seshadri et al, "Decarburization Rates in RH-KTB Degasser of the CST Steel Plant (Companhia Siderúrgica de Tubarão, Vitória, Brazil) Through a Physical Modeling Study", *Ironmaking & Steelmaking*, 33 (1) (2006), 34-38.
- 13 D. Guo and G.A. Irons, "Water Modeling of Vacuum Decarburization in a Ladle", *1998 Steelmaking Conference Proceedings*, (1998), 601-607.