

AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE DESSULFURAÇÃO DO GUSA LÍQUIDO EM UM REATOR KANBARA

Leandro Rocha Lemos¹
 Carlos Antônio da Silva²
 Itavahn Alves da Silva²
 Filipe Mansur³
 Varadarajan Seshadri⁴
 Odair José Kirmse⁵

Resumo

São analisados os efeitos de parâmetros operacionais sobre o desempenho de dessulfuração do gusa líquido num reator Kanbara à luz de modelagens matemática e física do processo, no qual são considerados o tamanho das partículas do reagente dessulfurante no banho, forma, profundidade de imersão, posicionamento e velocidade de rotação do agitador mecânico. As condições de dispersão do reagente são estudadas via modelagem física, e a necessidade de se incorporar a distribuição espacial no modelo é discutida. Abordam-se as implicações teóricas e práticas da descentralização do impelidor. Os resultados industriais mostram-se em concordância com os previstos por um modelo matemático que despreza as complexidades de maior ordem e permitem evidenciar a importância da velocidade de rotação e da granulometria do reagente.

Palavras-chave: Dessulfuração; Agitação; Dispersão; Reatores.

MAXIMIZING HOT METAL DESULFURIZATION IN A KANBARA REACTOR

Abstract

Mathematical and physical modeling of Kanbara process, which takes in consideration the particle size of the reagent, the shape, depth of immersion, rotation speed and positioning of the mechanical agitator have been used to assess the efficiency of desulfurization. The nature of the dispersion of the reagent has been studied through physical modeling, and the need to incorporate its spatial distribution in the model is discussed. Theoretical and practical implications of the decentralization of the impeller are also addressed. Desulfurization results taken from an industrial plant are in good agreement with a mathematical model that disregards the major complexities of the process. This model has been used to highlight the effects of rotational speed and particle size.

Key words: Desulfurization; Agitation; Dispersion; Reactors.

1 INTRODUÇÃO

A operação de dessulfuração do gusa pode ser conduzida em carros-torpedo ou painéis de transferência. A Figura 1 explicita os principais métodos industriais de dessulfuração e desfosforação nas estações de pré-tratamento do gusa: 1a) injeção profunda do reagente; 1b) adição do reagente sobre a superfície do banho seguida

de sua agitação pela passagem de fluxo gasoso; 1c) adição do reagente sobre a superfície do metal e dispersão das partículas do reagente via agitação mecânica. Nos processos de injeção de particulados sólidos em banhos metálicos, a fração de dispersão do agente dessulfurante é de no máximo 0,3,⁽¹⁾ enquanto que, no processo por agitação mecânica, via Reator Kanbara (KR), o grau de dispersão pode atingir e ser mantido em 100% durante toda operação de dessulfuração.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Professor do Instituto Federal de Minas Gerais, Mestrando da Redemat/UFOP. Rua João Dias da Mota, 340, Inconfidentes, Cep 36420-000, Ouro Branco, MG, Brasil. E-mail: leandro.lemos@ifmg.edu.br

² Professor Associado II, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP - Centro de Convergência, Campus Morro do Cruzeiro, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mails: casilva@demet.em.ufop.br; itavahn@demet.em.ufop.br

³ Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP. Rua João Dias da Mota, 340, Inconfidentes, Cep 36420-000, Ouro Branco, MG, Brasil. E-mail: fimansur@yahoo.com.br

⁴ Professor Emérito do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Cep 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: seshadri@demet.ufmg.br

⁵ Engenheiro Metalúrgico, MSc, ArcelorMittal Tubarão- Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 930, Jd. Limoeiro, Cep 29163-970, Serra, ES, Brasil. E-mail: odair.kirmse@arcelor.com.br

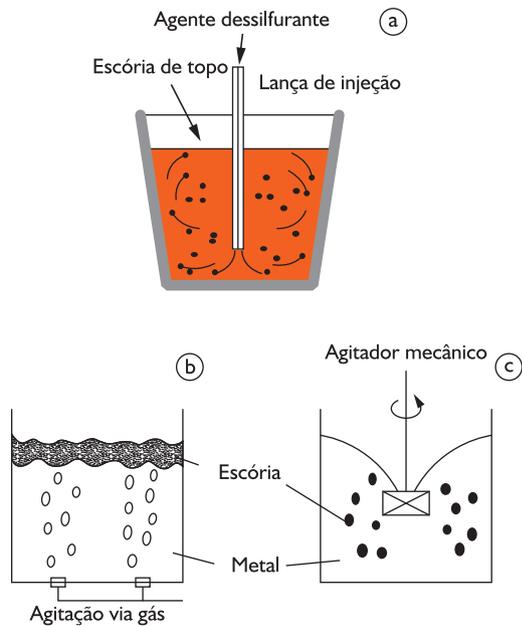


Figura 1. Métodos industriais de dessulfuração do gusa líquido na panela.⁽⁴⁾

Liu *et al.*⁽³⁾ demonstram a existência de três modalidades de fluxo atuando simultaneamente em um líquido agitado mecanicamente (Figura 2a): fluxo tangencial, fluxo radial e fluxo circulante. As contribuições destas modalidades de distribuições de fluxos são dependentes

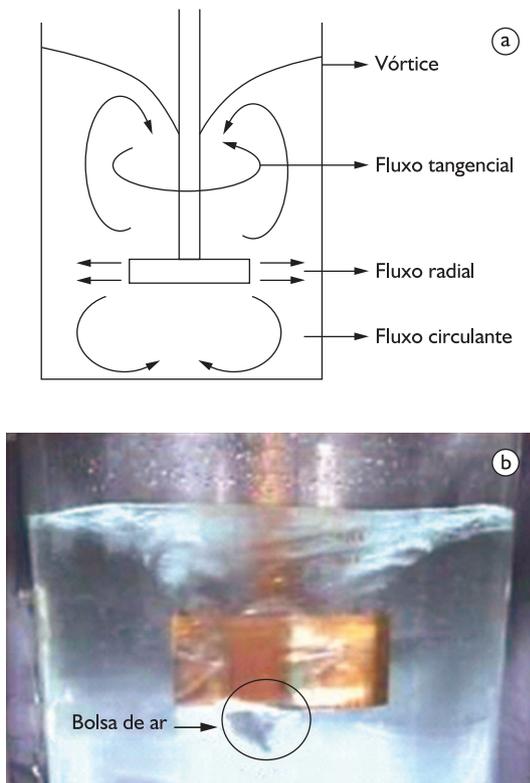


Figura 2. a) Tipos de fluxos durante a agitação mecânica do banho metálico; b) Formação de bolsão de ar sob a base do agitador mecânico.⁽⁴⁾

do tamanho, profundidade de imersão, velocidade de rotação e geometria do agitador mecânico, bem como das propriedades físicas do líquido e da temperatura de tratamento. A condição de fluxo circulante, a partir de certa condição crítica, pode favorecer o desenvolvimento e a estabilização de bolsão de ar sob a base do agitador mecânico (Figura 2b), o que acarreta o aumento do potencial de oxigênio no banho.

A condição de completa dispersão das partículas do dessulfurante maximiza a eficiência de dessulfuração para uma dada condição operacional. Nakai *et al.*⁽⁵⁾ ressaltam que o fenômeno de dispersão está em iminente condição de ocorrência quando o fundo do vórtice atinge a superfície superior do agitador, e que a condição de completa dispersão ocorre quando a profundidade do vórtice é próxima ou maior do que a da base do agitador mecânico.

Simultaneamente, a manutenção da condição de baixo potencial de oxigênio no banho metálico deve ser assegurada, o que causa a elevação do coeficiente de partição do enxofre entre o banho e o dessulfurante.

O aumento da velocidade de rotação, para uma dada profundidade de imersão e excentricidade do agitador mecânico, que poderiam levar a melhores condições de mistura, apresentam aplicação limitada, posto que o aumento da velocidade requer maior borda livre, maior perda do agente no momento da adição da mistura e taxa de desgaste do agitador mecânico, além de propiciar a formação de bolsão de ar sob a base deste último.

Um parâmetro importante para melhoria da eficiência metalúrgica do Reator Kanbara (KR) consiste na redução da granulometria do reagente particulado. No entanto, partículas mais finas tendem a crescer sobre a superfície do agitador mecânico, formando incrustações sobre esta última. Usinas japonesas não usam cal britada e sim bitolada, abaixo de 7,0 mm com o propósito de evitar tal problema. Esse acúmulo de material no agitador mecânico diminui a sua capacidade de bombeamento, desfavorecendo a macromistura, necessitando de aumento na sua velocidade de rotação para garantir essa mistura.

2 RESULTADOS DE MODELAGEM MATEMÁTICA VERSUS RESULTADOS INDUSTRIAIS

Silva *et al.*⁽⁶⁾ sugerem que a eficiência de dessulfuração do gusa no reator Kanbara pode ser expressa como:

$$E = \left[1 - \frac{[\%S]}{[\%S]_0} \right] 100 = \left(\frac{\lambda}{1 + \lambda} \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{k_s \rho_L A}{1000 M_L} \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) t \right) \right) \quad (1)$$

onde [%S] e [%S]₀ são os teores final e inicial de enxofre no banho, respectivamente (% em peso); k_s é o coeficiente de transferência de massa de enxofre através da camada limite da partícula de CaO dispersa (m/s); A é a

área efetiva da interface metal-partícula da mistura (m^2); ρ_L é a massa específica do banho (kg/m^3); M_L é a massa de gusa (t); t = tempo de tratamento (min); λ é um parâmetro termodinâmico. Os parâmetros λ e A podem ser estimados por:

$$\lambda = \frac{L_s (M_{ad})}{1000} \quad (2)$$

e

$$A \approx \frac{6M_{adic}}{\rho_p d_p} \quad (3)$$

onde L_s é o coeficiente de partição do enxofre entre o banho e a escória; M_{adic} é a massa de mistura (kg); ρ_p é a massa específica da partícula (kg/m^3); d_p é o diâmetro médio das partículas da mistura (m). Esta proposta despreza a participação da escória de arraste de alto forno, em geral parâmetro de difícil mensuração.

Para fins de implementação deste modelo o coeficiente de partição L_s precisa ser estimado, por exemplo, pela correlação empírica sugerida por Sosinsky *et al.*⁽⁷⁾.

$$\log L_s = \frac{21920 - 54640\Delta}{T} + 43,6\Delta - 23,9 + \log f_s - \log h_o \quad (4)$$

onde Δ é a basicidade óptica da escória ou do agente dessulfurante; f_s e h_o representam o coeficiente de atividade do enxofre e a atividade do oxigênio no banho, respectivamente.

Silva *et al.*⁽⁶⁾ consideram as seguintes equações empíricas para a estimativa do coeficiente de transferência de massa de enxofre através da camada limite metal-partícula e da taxa de dissipação de energia no reator Kanbara:

$$k_s = \frac{D_s}{d_p} \left[2 + 0,4 \left[\frac{\varepsilon d_p^4 \rho_L^3}{\mu^3} \right]^{1/4} \left(\frac{\mu}{D_s \rho_L} \right)^{1/3} \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{P}{1000M_L / \rho_L} = \frac{P0\rho_L\omega^3 D_{imp}^5}{1000ML / \rho_L} (m^2 / s^3) \quad (6)$$

Na Equação 5, k_s é o coeficiente de transferência de massa (m/s); D_s é a difusividade do enxofre no metal (m^2/s); d_p é o diâmetro da partícula (m); ρ_L é a massa específica do metal (kg/m^3); μ é a viscosidade dinâmica do metal ($kg/m.s$), ε é a taxa de dissipação de energia. Note-se que a taxa de dissipação de energia pode ser estimada a partir do Número de Potência, Po ; de ω , velocidade de rotação do impelidor (Hz); de D_{imp} , diâmetro do impelidor (m). Esta metodologia esbarra em duas dificuldades adicionais: 1) a necessidade de se determinar a curva de potência para condições definidas de operação (forma e posição do

impelidor e geometria da panela); 2) o fato de que, provavelmente, à medida que o processo avança, o controle da dessulfuração passa ao transporte de massa através da carapaça formada ao redor da partícula.

Mesmo sob estas limitações o modelo foi aplicado às operações da ArcelorMittal Tubarão, para as quais foram consideradas as condições operacionais e variáveis relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições operacionais de dessulfuração no reator Kanbara da ArcelorMittal Tubarão

Massa de gusa líquido tratado (t)	315	
Temperatura média de tratamento (°C)	1375	
Queda de temperatura durante o tratamento (°C)	18	
Consumo específico do agente dessulfurante (kg/t)	7	
Teor inicial de enxofre médio (ppm)	360	
Duração do tratamento (minutos)	Agitação	8
	Amostragem	3
	Agitação pós-raspagem de escória	8
	Total	27
Tamanho médio das partículas de CaO, com 80% < 1mm	< 3	
Massa média de escória de arraste do alto-forno (kg/t)	4,8	
Vida média do agitador mecânico (no. de corridas)	345	
Posicionamento do agitador mecânico	Excêntrico	

Para as condições operacionais delineadas na Tabela 1 foram consideradas 600 corridas, caracterizadas por uma faixa ampla de valores de temperatura, massa e composição inicial de enxofre no banho; consumos específicos da mistura dessulfurante, velocidades de rotação do agitador mecânico e tempos de tratamento. A Figura 3 representa a relação entre eficiência de dessulfuração observada na planta industrial e eficiência prevista pela modelagem matemática proposta em função do número de tratamento, onde a razão é praticamente unitária.

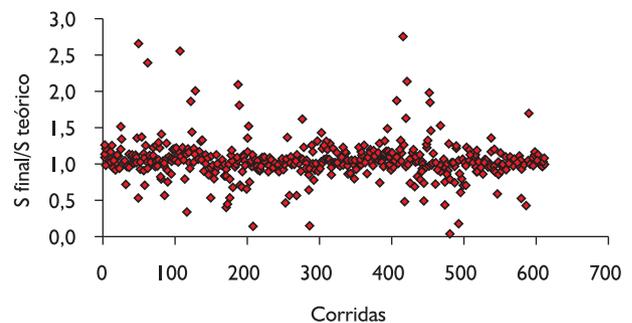


Figura 3. Razão entre eficiência de dessulfuração observada / eficiência de dessulfuração prevista pelo modelo.

Quanto ao efeito da velocidade de rotação do agitador mecânico, Figura 4a, mostra-se que a condição de equilíbrio virtual pode ser alcançada em 10 minutos, independentemente da velocidade de rotação. O principal efeito da velocidade de rotação do agitador mecânico é sobre a velocidade inicial de dessulfuração (pode-se mostrar que existe uma relação linear entre a velocidade de rotação e a taxa inicial de dessulfuração). Este resultado é importante como estratégia de encurtamento do tempo de tratamento. Já a Figura 4b mostra o efeito das dimensões das partículas do agente dessulfurante sobre o teor

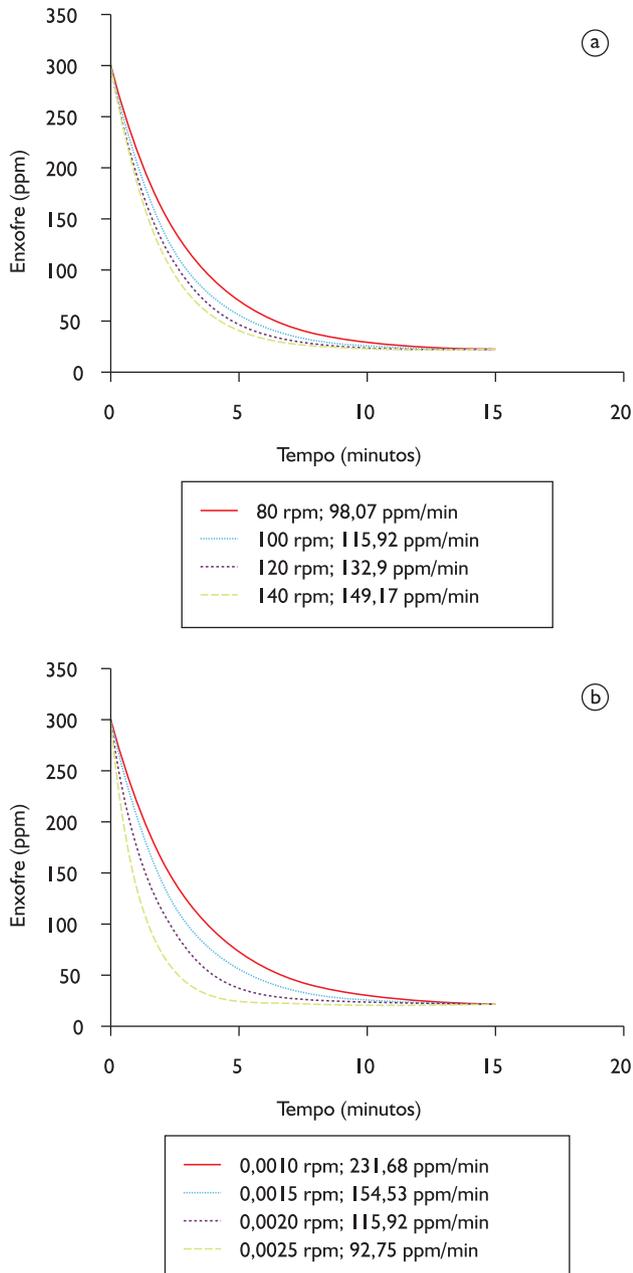


Figura 4. a) Influência da velocidade de rotação do agitador mecânico sobre a De-S; b) Influência do tamanho das partículas sobre a De-S.

final de enxofre. Novamente, este efeito é preponderante sobre a velocidade inicial de dessulfuração. Contudo, a velocidade inicial de dessulfuração mostra-se variar com o inverso do diâmetro ao quadrado. Este fenômeno é esperado desde que a área total de contato metal-partícula aumenta com o quadrado do diâmetro da partícula. Por isso, reflete a importância do controle do processo de peneiramento ou classificação do agente particulado.

Aplicando-se regressão múltipla, utilizando o software MINITAB® e uma população de 600 corridas, considerando os parâmetros operacionais e variáveis: massa de reagente (M_{adic}), velocidade de rotação do agitador mecânico (RPM), massa de gusa líquido (M_L), parâmetro termodinâmico do processo (λ) e teor inicial de enxofre no gusa (S_o , em ppm), foi obtida a seguinte correlação matemática para a taxa inicial de dessulfuração:

$$\frac{d[S]}{dt} = \frac{\left\{ -123,4 + 00,427M_{adic} + 30,0 S_o(\text{ppm}) \right\}}{\left\{ +8,654 \text{ RPM} - 5,32M_L + 3,28\lambda \right\}} \cdot 10^5 \quad (7)$$

$r^2 = 96\%$

A ausência da variável diâmetro das partículas do agente dessulfurante decorre do fato que o mesmo foi mantido constante nesta sequência de tratamentos industriais.

No entanto, embora a diminuição do tamanho médio do agente sólido deva melhorar a eficiência de dessulfuração, devem ser observadas maiores perdas do reagente em virtude do aumento da taxa de aspiração do particulado fino pelo sistema de despoeiramento do KR. Isso gera aumento do seu consumo específico. Esta desvantagem pode ser compensada pelo aumento da quantidade de material adicionado.

Neste sentido, o controle do posicionamento e a velocidade de rotação, bem como o momento de adição do agente dessulfurante, mostram-se como alternativas para maximização do grau de dispersão e inibição da formação e desenvolvimento de bolsão de ar sob a base do agitador mecânico. Isso desfavoreceria termodinamicamente o processo de dessulfuração.

A modelagem física do processo de dispersão foi conduzida, considerado para este reator em particular, reproduzido em escala 1:7. Foi utilizada solução de cloreto de zinco e água, cuja massa específica foi de 1,18 g/cm³, e a viscosidade em 1,626 cSt. Partículas plásticas de diâmetro médio de 1,0 mm foram usadas para a simulação do agente dessulfurante. Variou-se a rotação (70, 90, 110 e 130 RPM), forma (impeller quadrado-A, e curvo-B), profundidade de imersão do impeller (5 e 15 cm), bem como sua posição em relação ao eixo central da panela (excêntrica ou não). O grau de dispersão foi estimado como sendo proporcional à massa de partículas capturadas por unidade de tempo, por um amostrador com seção de captura colocado na direção azimutal. De acordo com a Figura 5a (determinada para

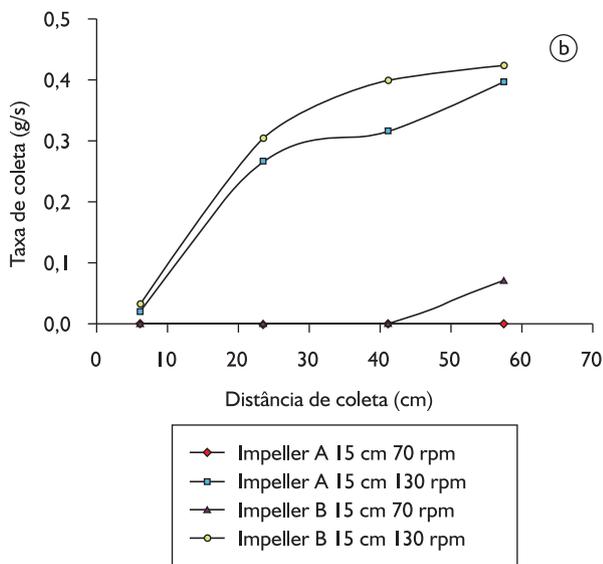
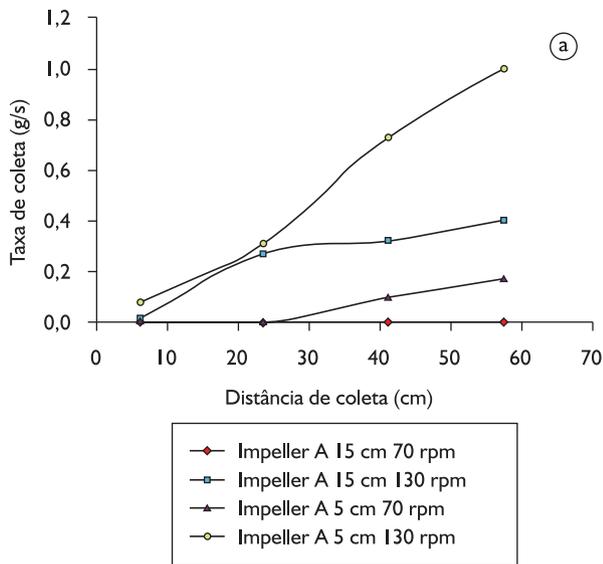


Figura 5. Efeito da velocidade de rotação e da profundidade de imersão do *impeller* B, centralizado, sobre a dispersão das partículas. a) efeito da imersão (5 e 15cm); b) efeito da forma do *impeller*, com imersão de 15cm.

um dado agitador mecânico), maiores velocidades de rotação e menores profundidades de imersão implicam em maiores taxas de dispersão. Entretanto, a distribuição de partículas mostra-se não uniforme. Já a Figura 5b explicita que a morfologia do agitador mecânico influencia visivelmente sobre a taxa de dispersão do agente particulado.

O efeito da excentricidade sobre as linhas de fluxo, obtidas por modelagem matemática via CFX, pode ser visto na Figura 6.

O modo de adição do agente dessulfurante influi substancialmente sobre o controle do rendimento metalúrgico do processo, especialmente no que tange à redução das perdas do agente dessulfurante pelo sistema

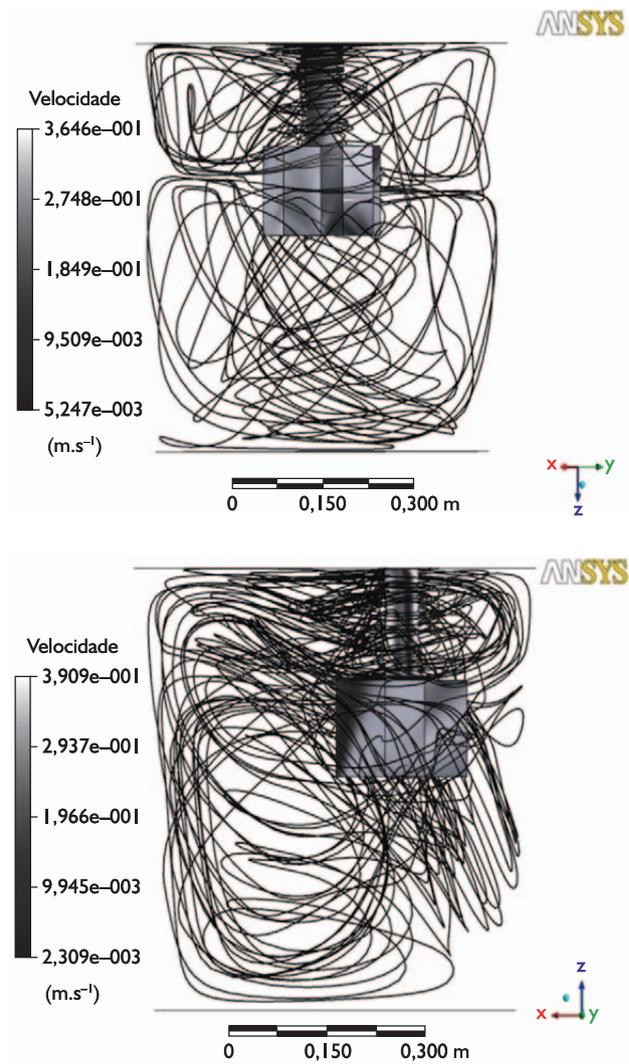


Figura 6. Efeito da excentricidade sobre a distribuição de fluxos no interior do KR: a) central; b) excêntrico.

de despoejamento, e também à minimização da formação de crosta do agente particulado sobre a superfície de topo do agitador mecânico, nos primeiros instantes da adição. A Figura 7 ilustra um *modus operandi* – profundidade de imersão e velocidade de rotação do agitador mecânico, durante a operação de De-S no KR: a) travamento do carro do agitador mecânico; b) imersão do agitador mecânico; c) aumento gradual de velocidade de rotação; d) estabilização da velocidade de rotação e adição gradual da mistura dessulfurante; e) aumento gradual da velocidade de rotação do agitador mecânico para dispersão do agente De-S; f) estabilização do posicionamento e velocidade de rotação do agitador mecânico; g) redução gradual da velocidade de rotação até a parada do agitador mecânico; h) suspensão até a completa retirada do agitador mecânico do banho; i) rotação livre do agitador mecânico para sua limpeza; j) retirada do agitador mecânico.

A duração efetiva do tratamento é composta do somatório das etapas descritas na Figura 7, acrescentada dos tempos de amostragem, raspagem de escória e de agitação do impeller, pós-raspagem.

Modelos de dessulfuração em KR precisam então levar em conta estes aspectos dinâmicos.

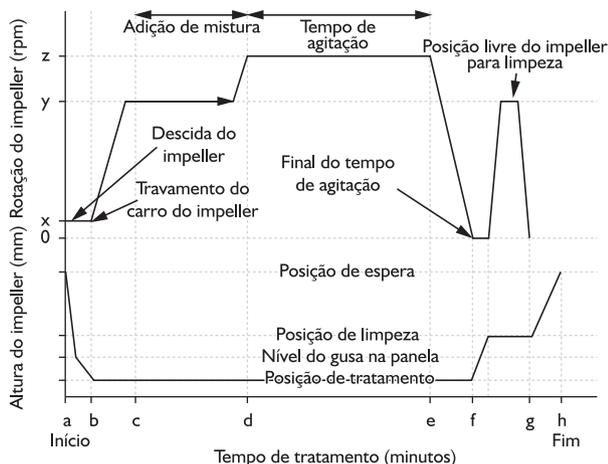


Figura 7. Modus operandi industrial de posicionamento e rotação do agitador mecânico no KR.

3 CONCLUSÃO

Esta análise ressalta as complexidades do tratamento de dessulfuração no KR. Modelos completos podem resultar em extrema complexidade em função das características dinâmicas apontadas.

A operação precisa levar em conta o desgaste e a formação de acreções no impelidor, o que pode causar modificações importantes na hidrodinâmica do processo.

Não obstante, modelos macroscópicos supersimplificados parecem ter sucesso na previsão das principais características do processo, quanto aos aspectos químicos.

Os resultados indicam concordância entre as eficiências de dessulfuração observadas e previstas por tal tipo de modelo. O efeito do tamanho da partícula mostra-se como o principal parâmetro influenciador sobre a eficiência de dessulfuração em virtude do aumento da magnitude da área efetiva da interface de reação metal-partícula. Isto reflete a importância do controle do processo de peneiramento. A influência da velocidade de rotação mostra-se principalmente sobre a taxa inicial de dessulfuração e então sobre a duração do tratamento.

Agradecimentos

À ArcelorMittal Tubarão e à Fapemig, pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- SILVA, C. A. et al. A kinetic model applied to on the molten pig iron desulfurization by injection of lime-based powders. *ISIJ International*, v. 37, n. 1, p. 21-30, 1997. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.37.21>
- KIRMSE, O. J. *Estudo do comportamento metalúrgico do reator kambara através de modelagem física*. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado – Redemat) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- LIU, Y. et al. Intensification of bubble disintegration and dispersion by mechanical stirring in gas injection refining. *ISIJ International*, v. 49, n. 1, p. 17-23, 2009. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.49.17>
- NAKAI, Y. et al. Effect of stirring condition on desulfurization of hot metal. In: AISTECH CONFERENCE, 2004. Proceedings. Warrendale, Association for Iron & Steel Technology, 2004. v. 1, p. 709-718
- SILVA, C. A. et al. A kinetic model applied to pig iron desulfurization in The Kanbara Reactor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SALTS, 8., 2009, Santiago, Chile. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2009. p. 4-9.
- SOSINSKY, D. J.; SOMMERVILLE, I. D. The composition and temperature dependence of the sulfide capacity of metallurgical slags. *Metallurgical Transactions B*, vol. 17, n. 2, p. 331-336, 1986. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02655080>

Recebido em: 30/9/2010

Aceito em: 18/3/2011