



MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DESSULFURAÇÃO DO GUSA LÍQUIDO NUM REATOR KANBARA¹

Leandro Rocha Lemos²
Carlos Antônio da Silva³
Itavahn Alves da Silva³
Filipe Mansur⁴
Varadarajan Seshadri⁵
Odair José Kirmse⁶

Resumo

São analisados os efeitos de parâmetros operacionais sobre o desempenho de dessulfuração do gusa líquido num reator Kanbara à luz de modelamento matemático e físico 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 foram 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 mecânica; Dispersão; Reator Kanbara.

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. The 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: Kinetics; Desulfurization; Dispersion; Kanbara reactor.

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

² Engenheiro Metalúrgico, Gerdau-Açominas

³ Professor Associado II, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP

⁴ Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP

⁵ Professor Emérito do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG

⁶ Engenheiro Metalúrgico, MSc, ArcelorMittal Tubarão

1 INTRODUÇÃO

A operação de dessulfuração do gusa pode ser conduzida em carros-torpedo ou panelas de transferência. A Figura 1 explicita os principais métodos industriais de De-S e de De-P nas estações de pré-tratamento do gusa: 1a) Injeção profunda do reagente; 1b) adição do reagente sobre a superfície do banho seguida de agitação deste pela passagem de fluxo gasoso; c) 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, o grau de dispersão pode atingir e ser mantido em 100% durante toda operação de dessulfuração.

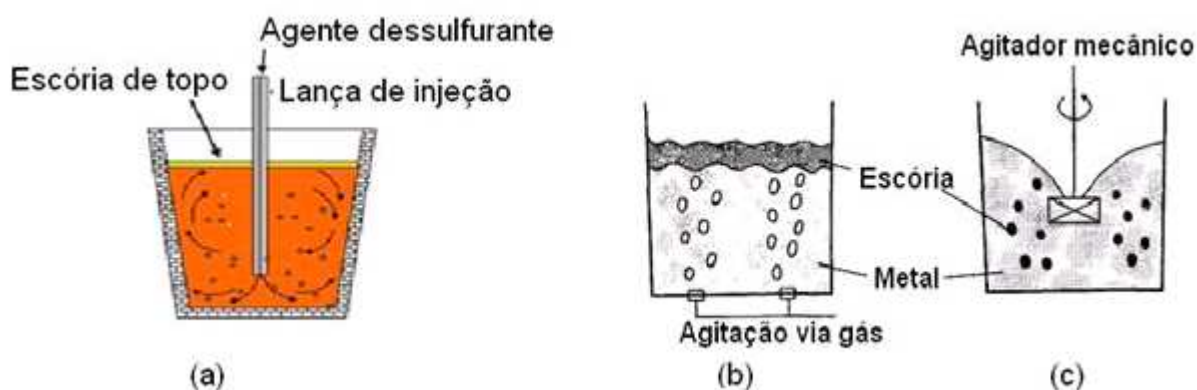


Figura 1 – Métodos industriais de dessulfuração do gusa líquido na panela.

O desempenho das operações de De-S e de De-P do gusa na panela, via agitação mecânica, é substancialmente superior ao do processo de injeção (Figura 2^a), em decorrência da maximização da área e do tempo de contato banho-mistura, durante a operação de agitação, resultando em maior eficiência de utilização e menor consumo específico do reagente adicionado, provavelmente por causa dos maiores valores dos coeficientes de transferência de massa (Figura 2b).

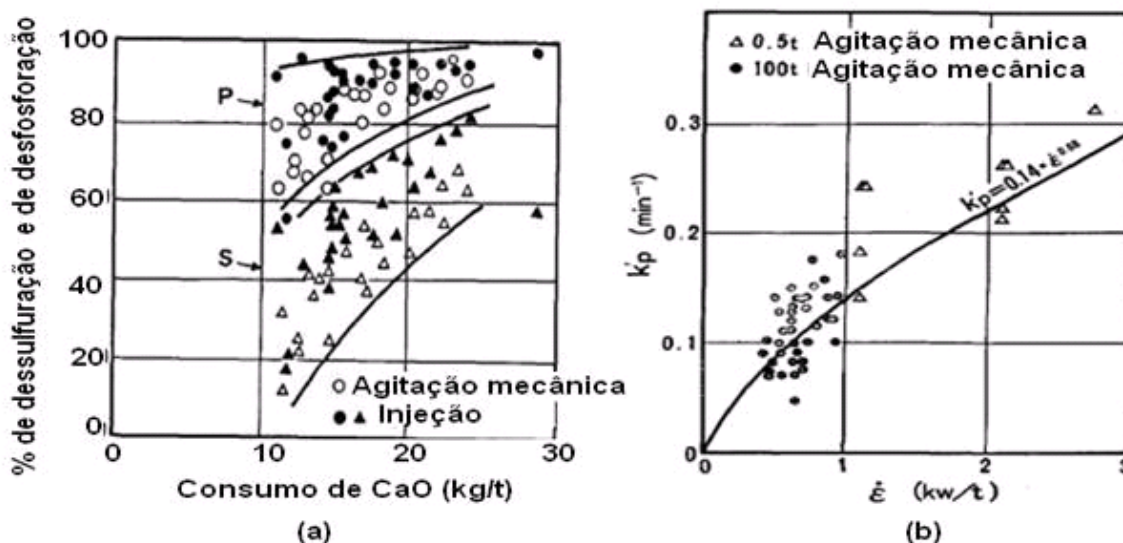


Figura 2 – Comparação do efeito do consumo específico de CaO sobre a eficiências de dessulfuração e de desfosforação do gusa com dispersão por injeção e agitação mecânicas.⁽²⁾

Liu et al.⁽³⁾ demonstram a existência de três modalidades de fluxo atuando simultaneamente em um líquido agitado mecanicamente (Figura 3a): fluxo tangencial, fluxo radial e fluxo circulante. As contribuições destas modalidades de distribuições de fluxos são dependentes 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 estabilização de bolsão de ar sob a base do agitador mecânico (Figura 3b), o que é maléfico termodinamicamente à reação de dessulfuração.



Figura 3 – a) Tipos de fluxos durante a agitação mecânica do banho metálico; b) Formação de bolsão de ar sob a base do agitador mecânico.⁽⁴⁾

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 bojo vertical 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, os quais 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 (Figura 4b); além de propiciar a formação de bolsão de ar sob a base deste último (Figura 3b).



Figura 4 – Perfil do agitador mecânico: a) Agitador mecânico novo; b) Acreções na parte superior do agitador mecânico.

Um parâmetro importante para melhoria da eficiência metalúrgica do 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 (Figura 4b). Usinas japonesas não usam cal britada e sim bitolada, abaixo de 7 mm com o propósito de evitar tal problema. Esse acúmulo de material no agitador mecânico diminui a capacidade de bombeamento do mesmo, desfavorecendo a macromistura, necessitando de aumento na velocidade de rotação do mesmo para garantir essa mistura. Este procedimento soluciona o problema de macromistura, mas causa muitos outros problemas como desgaste prematuro nas pás do agitador mecânico; aumento no torque do eixo do agitador mecânico e, portanto, aumento no consumo de energia, além da diminuição na vida útil dos componentes mecânicos.

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:

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

onde $[\%S]$ e $[\%S]_o$ = teores final e inicial de enxofre no banho, respectivamente, % em peso ; k_s = coeficiente de transferência de massa de enxofre através da camada limite da partícula de CaO dispersa, m/s; A = área efetiva da interface metal-partícula da mistura, m^2 ; ρ_L = densidade do banho, kg/m^3 ; M_L = massa de gusa, toneladas; t = tempo de tratamento, minutos; λ = parâmetro termodinâmico. λ e A podem ser estimados por:

$$\lambda = \frac{L_s (M_{ad})}{1000} \quad e \quad A \approx \frac{6 M_{adic}}{\rho_p d_p}$$

Aqui, L_s = coeficiente de partição do enxofre entre o banho e a escória; M_{adic} = massa de mistura; kg; ρ_p = densidade da partícula, kg/m^3 ; d_p = 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 e Sommerville.⁽⁷⁾

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

Onde Δ = basicidade ótica da escória ou do agente dessulfurante; f_s e h_o representam coeficiente de atividade do enxofre e atividade do oxigênio no banho respectivamente. Ressalta-se a importância dos baixos potenciais de oxigênio, em princípio mantido constante pela grafita em saturação, e a indefinição sobre a verdadeira natureza do meio dessulfurante, uma mistura semi-sólida (assim desejada para facilitar a raspagem ao final do processo).

⁽⁶⁾ consideraram 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:

$$k_s = \frac{D_s}{d_p} \left[2 + 0,4 \left[\frac{\varepsilon d_p^4 \rho_L^3}{\mu^3} \right]^{1/4} \left(\frac{\mu}{D_s \rho_L} \right)^{1/3} \right] \quad \text{e} \quad \varepsilon = \frac{P}{1000 M_L / \rho_L} = \frac{P_o \rho_L \omega^3 D_{imp}^5}{1000 M_L / \rho_L} \quad (m^2/s^3)$$

Nesta expressão 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, P_o ; 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 as seguintes condições operacionais e variáveis foram consideradas:



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

Massa de gusa líquido tratado (ton.)	315	
Temperatura média de tratamento (°C)	1375	
Queda de temperatura durante o tratamento, (°C)	18	
Consumo específico do agente dessulfurante (kg/ton.)	7	
Teor inicial de enxofre médio (ppm)	360	
Duração do tratamento (min)	Agitação	8
	Amostragem	3
	Agitação pós-raspagem de escória	8
	Total	27
Teor inicial de enxofre médio (ppm)	360	
Tamanho médio das partículas de CaO , com 80% < 1mm	< 3	
Massa média de escória de arraste do alto-forno (kg/ton)	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 considerados 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 5 representa a relação entre eficiência de dessulfuração observada na planta industrial e eficiência prevista pelo modelamento matemático proposto em função do número de tratamento, onde a razão é praticamente unitária.

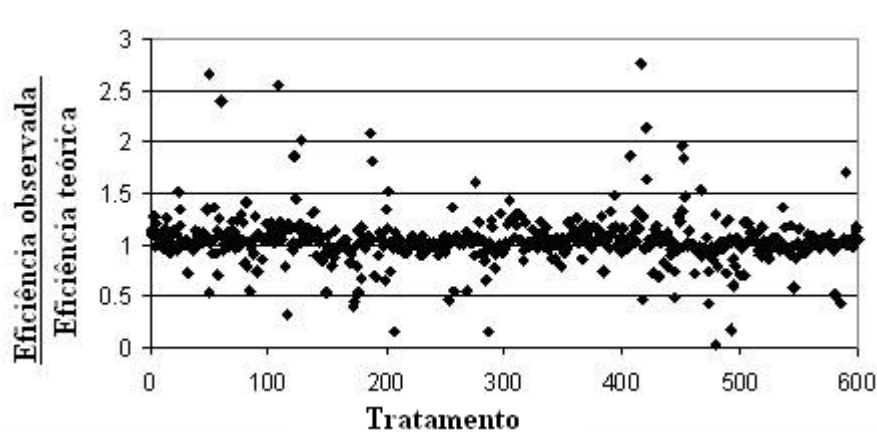


Figura 5 - Razão entre eficiência de dessulfuração observada / eficiência de dessulfuração prevista pelo modelo.

Quanto ao efeito da velocidade de rotação do agitador mecânico, figura 6a, mostra-se que a condição de equilíbrio virtual pode ser alcançada em 10 min, 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 6b mostra o efeito das dimensões das partículas do

agente dessulfurante sobre o teor final de enxofre. Novamente, este efeito é preponderante sobre a velocidade inicial de dessulfuração. Contudo, a velocidade inicial de dessulfuração mostra-se variar com 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.

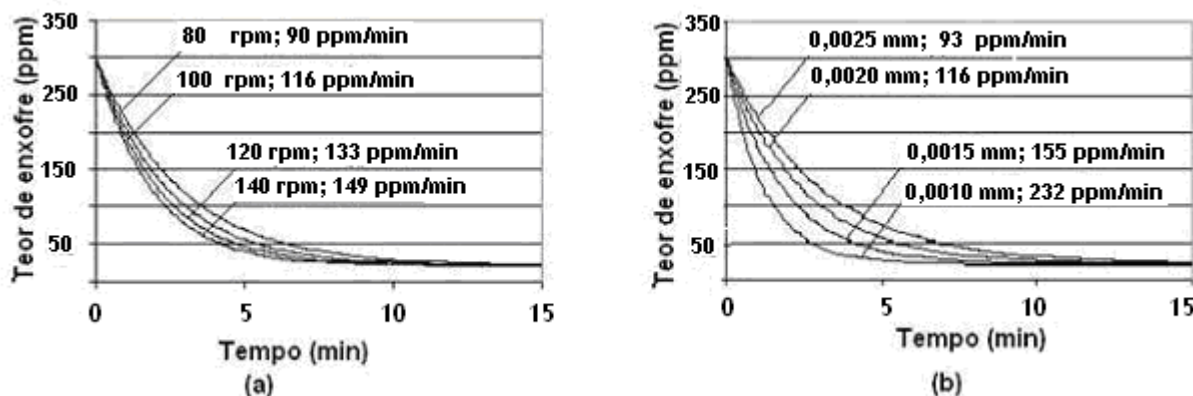


Figura 6 – a) Influência da velocidade de rotação do agitador mecânico sobre a De-S; b) Influência do tamanho das partículas sobre a De-S.

A através de regressão múltipla, utilizando o software MINITAB™ e uma população de 650 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), temperatura média de tratamento (K) e teor inicial de enxofre no gusa (ppm), a seguinte correlação matemática foi obtida para a taxa inicial de dessulfuração:

$$-\frac{d[S]}{dt} = \{-123,4 + 00,427 M_{adic} + 30,0 So(ppm) + 8,65 RPM - 5,32 M_L + 3,28 \lambda\} / 10^5$$

$$r^2 = 96\%$$

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, maiores perdas do reagente devem ser observadas em virtude do aumento da taxa de aspiração do particulado fino pelo sistema despoeiramento do KR, incorrendo no 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; o que desfavoreceria termodinamicamente o processo de dessulfuração. Modelagem física do processo de dispersão foi conduzida considerado este reator em particular, reproduzido em escala 1:10. Foram utilizadas soluções de cloreto de zinco e água, de modo a controlar a massa específica em $1,267 \text{ g/cm}^3$ e a viscosidade em $1,93 \text{ cSt}$ e partículas plásticas de diâmetro médio de 1 mm para emulação do gusa e das partículas do agente dessulfurante. Variou-se a rotação, forma, profundidade de imersão do impelidor 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 7a (determinada para um dado agitador mecânico), maiores velocidades de rotação e menores profundidades de imersão implicam em maiores taxas de dispersão. Entretanto a distribuição de partículas se mostra extremamente não uniforme. Já a figura 7b explicita que a morfologia do agitador mecânico influencia visivelmente sobre a taxa de dispersão do agente particulado.

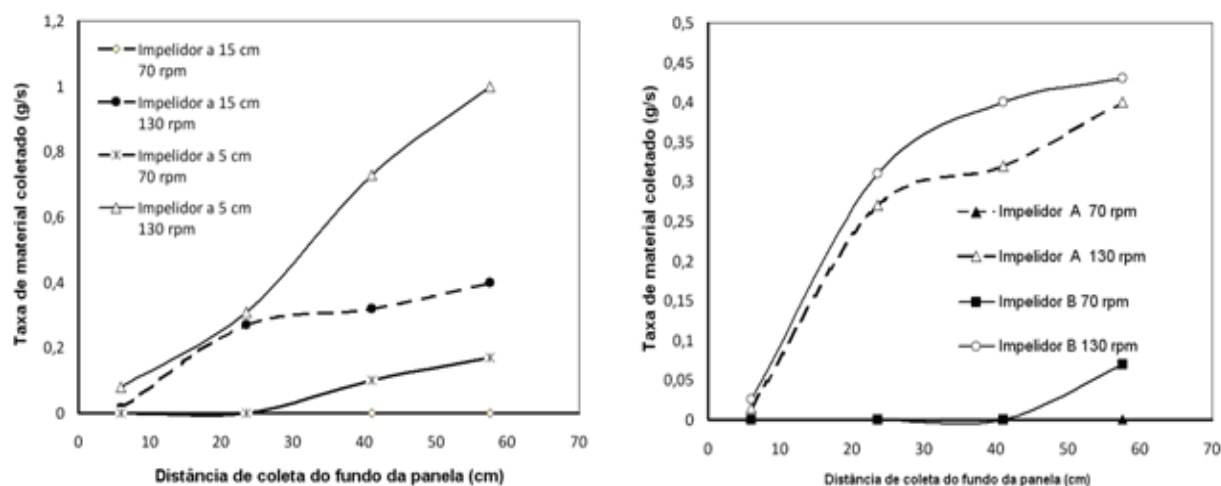


Figura 7 – Efeito da velocidade de rotação e da profundidade de imersão sobre a dispersão das partículas. a) efeito da imersão; b) efeito da forma do impelidor, com imersão de 15cm.

Com a descentralização do agitador mecânico na panela de pré-tratamento do gusa, a distribuição de fluxos no banho metálico é substancialmente modificada em decorrência do desbalanceamento das forças inerciais e gravitacionais. Com isto a tendência de desenvolvimento de vórtices sob a base do agitador é inibida, coibindo a formação de bolsão de ar e favorecendo a dispersão do agente dessulfurante. O efeito da excentricidade sobre as linhas de fluxo, obtidas por modelagem matemática via CFX, pode ser visto na Figura 8.

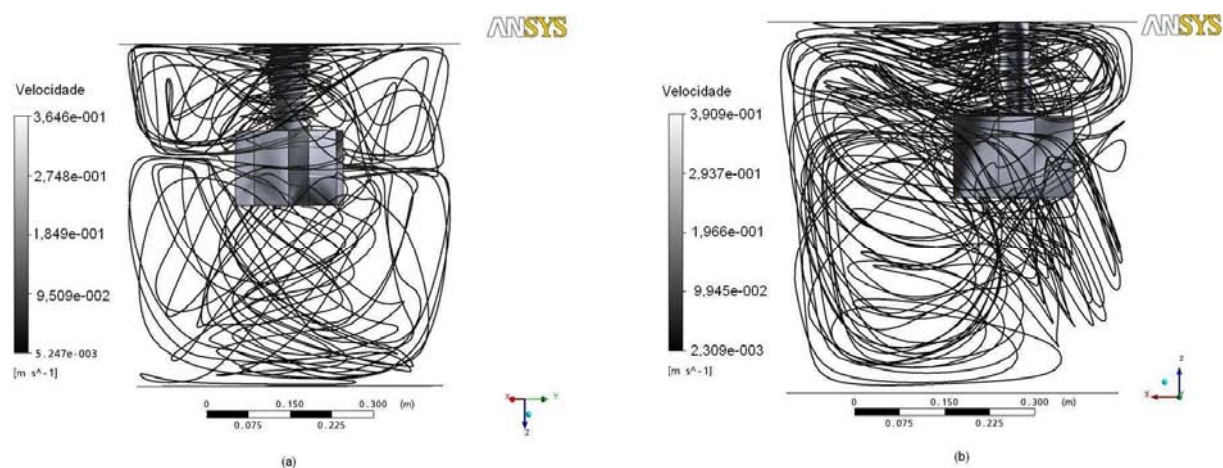


Figura 8 - Efeito da excentricidade sobre a distribuição de fluxos no interior do KR: a) central; b) excêntrico.

Além dos benefícios resultantes da modificação da distribuição de fluxos, e com isto, a distribuição espacial e o grau de dispersão do agente dessulfurante no banho, a descentralização do agitador mecânico, para uma dada condição operacional, reduz sensivelmente a taxa de desgaste do agitador (Figura 9).



Figura 9 – Perfis de desgaste: a) Agitador do KR, após 16 corridas; operação descentralizada; b) Agitador do KR, após 5 corridas, posição central.

Dois problemas adicionais decorrem desta análise. O primeiro diz respeito à distribuição não uniforme das partículas; o segundo decorre da distribuição também não uniforme da taxa de dissipação de energia, ε , o que implica em uma distribuição espacial de valores de coeficientes de transferência de massa, K_S .

Finalmente, 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 de desempoeiramento e à minimização da formação de crosta do agente particulado sobre a superfície de topo do agitador mecânico, nos primeiros instantes da adição. A Figura 10 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 compõe do somatório das etapas descritas na Figura 10, acrescentado dos tempos de amostragem, raspagem de escória e de agitação pós-raspagem e, muitas vezes, adicionado do tempo de pré-tratamento do banho. Pode-se proceder à antecipação do momento de adição logo após a imersão do agitador mecânico, sob baixa velocidade de rotação. Quando o agitador mecânico atinge a posição de tratamento, procede-se a elevação da velocidade de rotação, resultando em redução substancial das perdas do dessulfurante em comparação quando da prática sem antecipação da adição do agente.

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

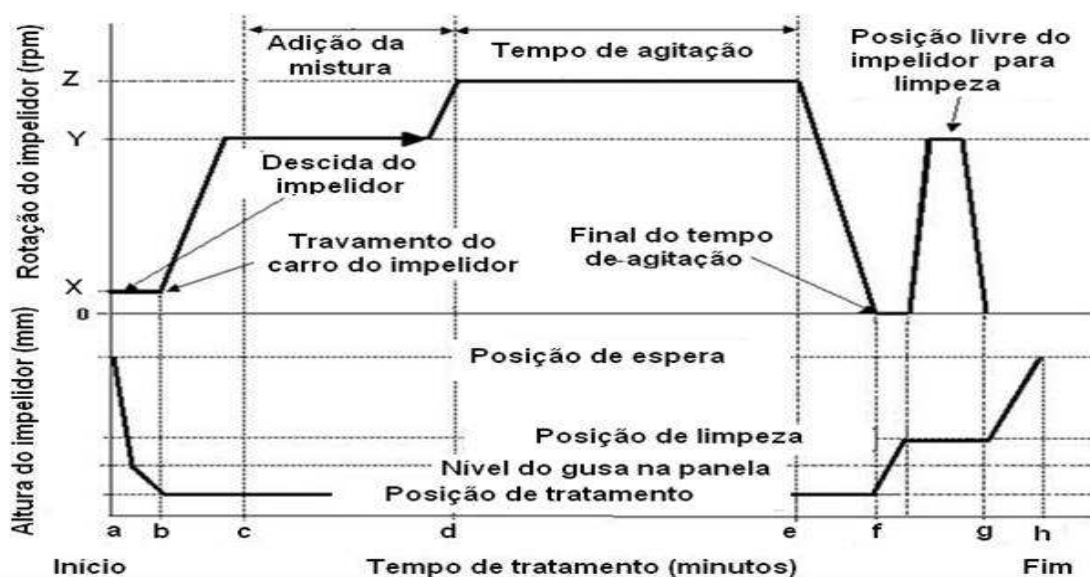


Figura 10 – Modus operandi industrial de posicionamento e rotação do agitador mecânico no KR

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 acréscos no agitador, 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 observada e prevista por tal tipo de modelo. O efeito do tamanho da partícula mostrou-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 se mostra principalmente sobre a taxa inicial de dessulfuração e então sobre a duração do tratamento.

Agradecimentos

ArcelorMittal Tubarão e FAPEMIG, pelo apoio.

4 REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, C.A, SILVA, I. A, SESHADRI, V, von KRÜGER, P - **A Kinetic Model Applied to on the Molten Pig Iron Desulfurization by Injection of Lime-based Powders** International, ISIJ, Vol. 37, 1,1997 , p 21-30
- 2 UMEZAWA, K; MATSUNAGA, H; ARIMA, R; TONOMURA, S & FURGAKI, I – **The Influence of Operating Condition on Dephosphorization and Desulphurization Reactions of Hot Metal With Lime-based Flux** – ISIJ International, 1983, p. 114-121
- 3 LIU, Y; SANO, M; ZHANG, T; WANG, Q & HE; J - **Intensification of Bubble Disintegration and Dispersion by Mechanical Stirring in Gas Injection Refining** - ISIJ International, Vol. 49 (2009), No. 1, pp. 17–23



- 4 KIRMSE, O. J - **Estudo do Comportamento Metalúrgico do Reator Kambara Através De Modelagem Física** – Dissertação de Mestrado – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006
- 5 NAKAI, Y; SUMI, I; KIKUCHI, N; OGAWA, H; MATSUNO, H & TAKEUCHI, S - **Effect of Stirring Condition on Desulfurization of Hot Metal** AISTech 2004 Proceedings - Volume I, 2004, 709-716
- 6 SILVA, C.A; SILVA, I.A; LEÃO, V. A; SESHADRI, V; LEMOS, L, R; KIRMSE, O. J: **A Kinetic Model Applied To Pig Iron Desulfurization In The Kanbara Reactor**. In: Proceedings of the VIII International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, 2009, Santiago, Chile. Proceedings of the VIII International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, 2009.
- 7 SOSINSKY, D. J, SOMMERVILLE, I. D. **The Application of. Optical Basicity Concept to Metallurgical Slags** - Metallurgical Transactions B, vol. 17B, 1986, p. 331-336