

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO CAL-Mg DE DESSULFURAÇÃO DO GUSA ATRAVÉS DO USO DE LANÇA ROTATIVA¹

Sérgio Luiz de Souza Costa²
Eugênio Pacelli Meireles de Araújo³
Ivan Lopes Alves⁴
Jorge Lima de Siqueira⁵

Resumo

A dessulfuração de gusa foi consideravelmente acelerada pela adoção do processo Cal-Mg. Nesse processo, o magnésio é utilizado para reduzir o teor de oxigênio dissolvido no gusa para próximo de zero e, em tais condições de desoxidação, o poder dessulfurante da cal é aumentado, o que explica a eficiência do referido processo. Nesse estudo, avaliou-se a utilização da lança rotativa em substituição à atual lança de injeção de mistura de material dessulfurante na Aciaria 1 da Usiminas. Além disso, desenvolveu-se um critério, que leva em conta as dimensões do equipamento e as taxas de injeção de gás e de material dessulfurante, para otimização do processo Cal-Mg e para transposição dos resultados obtidos para plantas de dessulfuração de gusa de maior dimensão. A lança rotativa promoveu uma melhor distribuição do material dessulfurante, obtendo-se uma elevação na taxa de dessulfuração de 18% e diminuição da ocorrência de projeção de metal. A transposição dos resultados de dessulfuração de gusa para uma planta de maior porte foi realizada com sucesso, o que permite concluir que o critério desenvolvido pode ser usado para a tomada de decisão quanto à implantação da lança rotativa em outras plantas industriais, sem a necessidade de realização de experiências. O critério desenvolvido também pode ser utilizado em estudos de otimização de outras plantas industriais.

Palavras-chave: Processo Cal-Mg; Dessulfuração de gusa; Lança rotativa.

OPTIMIZATION OF LIME-MG HOT METAL DESULPHURIZATION BY USING ROTATING LANCE

Abstract

The hot metal desulfurization has been speeded up considerably by adoption of lime-Mg process. In this process, the magnesium is used to reduce the oxygen content in the hot metal to almost zero and, in such a condition of deoxydation, the desulphurization power of the lime is increased, thus explaining the efficiency of such process. In the present study, preliminary experiments were carried out in cold models, using rotating lance, that resulted a better material distribution. The rotating lance tested in the hot metal desulphurization plant of Usiminas' Steel Plant 1 promoted a 18% increase in the desulphurization rate, a 54% decrease in temperature drop during the treatment, as well as a reduction of metal splash occurrences. It was applied a transposition model, whose criteria takes into account the equipment dimensions and the mass flow rate of the desulphurization material. In order to evaluate the applicability of the this model, the results of hot metal desulphurization obtained in a 100 kg atmospheric induction furnace were transposed to a 160 t torpedo car. The theoretical desulphurization results were very close to the measured values. Therefore, by using the results obtained from tests made in the Steel Shop plant # 1, it was possible to simulate scenarios based on the technical environment of hot metal desulphurization, aiming the optimization of the Lime-Mg process. From this results it was possible to predict the desulfurization rate, the material consumption and the treatment time, which can indicates the technical and economical viability of the rotating lance. Therefore, the implementation of rotating lance in any desulphurization plant can be done without the necessity of previous experiences.

Key words: Lime-Mg process; Hot metal desulfurization; Rotating lance, Transposition.

¹ Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² Engenheiro Metalurgista, Dr., Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Engenheiro Metalurgista, Gerência de Convertedor da Aciaria 1 da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Técnico Metalurgista, Gerência de Convertedor da Aciaria 1 da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁵ Técnico Metalurgista; Assistente Técnico da Insider, Cel Fabriciano- MG.

1 INTRODUÇÃO

Na fabricação do aço o pré-tratamento do gusa é de fundamental importância para a obtenção de produtos de melhor qualidade. A busca de eficiência nesse processo tem resultado em novos procedimentos e inovações nos equipamentos.

No tratamento de dessulfuração do gusa promove-se a injeção de pós dessulfurantes, no interior do metal líquido, utilizando-se lanças refratárias e um gás de arraste, normalmente o nitrogênio. Tais lanças são dotadas de movimento apenas vertical e têm por finalidade a injeção de pós a uma maior profundidade possível, com pressão e vazão limitadas para se evitar desgaste prematuro do fundo da panela e o transbordamento de metal líquido. Visando principalmente minimizar esses problemas, foi realizada uma avaliação qualitativa da injeção de pós, em um modelo físico, utilizando-se uma lança com dois furos horizontais, dotada de movimento de rotação em torno do seu eixo, e comparada com a utilização de uma lança fixa. A melhor distribuição de linhas de fluxo, obtida com a lança rotativa, motivou a realização de experiências industriais na Aciaria 1 da Usiminas.

No presente estudo, através de um trabalho conjunto Usiminas/Insider, foi avaliada a eficiência da utilização da lança rotativa no pré-tratamento de dessulfuração do gusa, em panela pelicano, por meio do processo Cal-Mg. Além disso, aplicou-se um modelo de transposição desenvolvido por Costa⁽¹⁾ que permite prever os resultados de dessulfuração de gusa em outras plantas industriais de diferentes dimensões, viabilizando a tomada de decisão quanto à implantação desta lança, sem a necessidade de realização de experimentos industriais.

2 EXPERIÊNCIAS REALIZADAS NA PLANTA DE DESSULFURAÇÃO DE GUSA DA ACIARIA 1

2.1 Modelo Físico

Os primeiros testes consistiram de uma avaliação qualitativa da injeção de pós, em um modelo físico, construído em escala 1:5, utilizando-se uma lança com dois furos horizontais, dotada de movimento de rotação em torno do seu eixo, e comparado com a utilização de uma lança fixa. A melhor distribuição de linhas de fluxo, obtida com a lança rotativa, motivou a realização de experiências industriais na Aciaria 1 da Usiminas.

Esses resultados levaram ao desenvolvimento de uma lança rotativa, em escala industrial, com o objetivo de se realizar testes industriais, cujos resultados evidenciaram a promissora eficiência da lança rotativa na dessulfuração do gusa.

2.2 Descrição Geral do Funcionamento da Lança Rotativa

A Figura 1 ilustra a lança refratária e o seu sistema de fixação, que consiste da junta rotativa, do carro de sustentação da lança e do moto redutor.



Figura 1. Desenho esquemático do sistema de sustentação e giro da lança rotativa.

A junta rotativa permite o acoplamento da lança com uma mangueira de injeção de gás e pó sem que esta gire junto com a lança. A lança é revestida com refratário e possui dois orifícios na extremidade para injeção de material dessulfurante. O moto redutor é equipado para promover a regulação da rotação da lança durante o seu movimento de descida. O carro de sustentação permite que a lança possa ser imersa no metal. Este carro possui inversores de frequência que promovem o seu sincronismo e o controle da velocidade de subida e de descida da lança.

O equipamento possui um sistema de troca rápida da lança refratária em caso de entupimento. Na parte inferior do conjunto existe uma caixa revestida de isolamento térmico que impede a transferência de calor para o equipamento, a fim de proteger a lubrificação das engrenagens e rolamentos. A lubrificação do equipamento é executada através de pinos graxeiros, localizados na parte externa do sistema, sem ter que se desmontar o equipamento.

O equipamento é montado e alinhado de forma que o centro da lança coincida com o centro da panela. A lança deve ficar a uma distância de 300 mm da sola da panela quando estiver no seu ponto máximo inferior e a 1000 mm fora da panela no seu ponto máximo superior. Tal controle é feito através dos limitadores de curso que interrompem a energia nos motores dos carros de elevação.

2.3 Condições Experimentais

Numa primeira etapa foram acompanhados 24 tratamentos de dessulfuração de gusa, sendo 12 com utilização da lança rotativa e 12 com a lança convencional. Nessas experiências avaliou-se os teores iniciais e finais de enxofre, a queda de temperatura, o desgaste de refratário da lança e, qualitativamente, o nível de projeção de metal para se ter uma comparação da eficiência global dos dois processos.

Numa segunda etapa foram acompanhadas 25 tratamentos de dessulfuração de gusa na Aciaria 1, retirando-se amostras em intervalos de um minuto, ao longo de todo o tratamento de dessulfuração de gusa com lança rotativa. Essas amostras foram analisadas e, com base nos teores de enxofre, determinou-se o coeficiente de transferência de massa. A partir desse coeficiente, efetuou-se uma transposição dos resultados para uma planta de dessulfuração de gusa com dimensões diferentes. Os principais parâmetros de projeto e operacionais da planta de dessulfuração de gusa da Aciaria 1 e das dimensões consideradas na transposição são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Grandezas relacionadas com o equipamento da Aciaria 1 e com as simulações.

Parâmetros	Aciaria 1	Simulações
Diâmetro da panela (m)	2,8	3,5
Altura da panela (m)	3	3,8
Peso de gusa (t)	65	160
Vazão de gás de arraste (Nm ³ /h)	15	60 a 120
Taxa de injeção de magnésio (kg/min)	6	10 a 20
Taxa de injeção de cal (kg/min)	24	40 a 80
Borda livre (m)	0,8	0,44
Temperatura (°C)	1300 a 1350	1300 a 1350
Enxofre inicial (%)	0,025 a 0,045	0,025 a 0,045

3 CRITÉRIO GERAL PARA TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS

De um modo geral, pode-se dizer que toda a divergência, reportada na literatura, entre resultados de laboratório e escala industrial, em tratamentos de metal líquido, se deve a fatores cinéticos, diretamente ligados ao nível de agitação do banho. É consenso na literatura que a eficiência de todos os processos metalúrgicos industriais, envolvendo reações químicas é fortemente dependente do grau de agitação do banho⁽¹⁾, representado por ε (W/t), também conhecido como taxa de dissipação de energia no banho, que é diretamente ligado ao tempo requerido para mistura perfeita.

O efeito das dimensões do reator tem sido considerado, embora não exista consenso sobre como expressar sua influência⁽²⁻⁶⁾. Pode-se ver, ainda, que os critérios disponíveis na literatura citada são válidos só para faixas específicas de tamanho de reator e que uma transposição confiável e geral de dados, da escala de laboratório para a industrial, com base nesses critérios, não é possível.

A Tabela 2 apresenta um resumo das diversas relações de transposição de resultados propostas na literatura, com as dimensões e os campos de validade.

Tabela 2. Resumo das relações de transposição disponíveis na literatura.

Pesquisador	Relação	Validade
Nakanishi ⁽³⁾ (1974)	$\tau \propto \varepsilon^{-0,4} (m^{-0,8}s^{1,2})$	Pequenas mudanças de escala (L, D e ε). Significado físico não é claro.
Ohguchi ⁽⁴⁾ (1979)	$k \propto \varepsilon^{1/2} (m.s^{-3,2})$	Pequenas mudanças de escala (L, D e ε). Significado físico não é claro.
Watanabe ⁽⁵⁾ (1983)	$k \propto \varepsilon^{1/3} (m^{2/3}s^{-1})$	Ajustou a influência de ε . Ignora efeito das dimensões do equipamento. Válida para pequenas variações de tamanho do reator.
Sano ⁽⁶⁾ (1983)	$\tau = 100[(D^2/L)^2]^{-0,337} (m^{0,67})$	Para previsão de tempos de mistura perfeita em pequenos reatores e modelos a frio. Significado físico não é claro.
Asai ⁽²⁾ (1983)	$k \propto (\varepsilon L^3/D^2)^{1/3} (m/s)$	Processos pouco agitados; antes de se atingir a microescala de turbulência. Expressa a velocidade de escoamento na microescala de turbulência.
Kitamura ⁽⁷⁾ (1991)	$k \propto \varepsilon L^2/D (m^3s^{-3})$	Grandes mudanças de escala. Significado físico não é claro.

* L - altura da panela, D - diâmetro da panela, ε - taxa de dissipação de energia, k - coeficiente de transferência de massa e τ - tempo requerido para misturamento perfeito.

Nos processos com escoamento turbulento a etapa controladora é a transferência de momento e massa, que irá ocorrer na microescala de turbulência, onde predominam as forças viscosas. É importante observar que a presença do expoente 1/3 está em concordância com diversas correlações experimentais ^(2,5,6). Tal expoente é justificado pelas condições de fluxo nos diversos processos industriais e de laboratório, cujas taxas de dissipação de energia são superiores a 4 W/t⁽⁸⁾. Tal fato indica que o controle da mistura se dá pela difusão de redemoinhos⁽⁸⁾. Como o critério proposto por Asai tem dimensão de m/s, ele representa a velocidade de escoamento na microescala de turbulência, ou seja, a convecção do metal líquido em estado estacionário. Nesse sentido, seria válido como critério de transposição só para processos com taxa de dissipação de energia inferiores a 4 W/t, nos quais as transferências de massa e momento são controlados pelas forças de inércia.

Tomando como base o trabalho de Asai et al.⁽²⁾, Costa⁽¹⁾ propôs um critério geral de transposição de resultados, tendo em vista as limitações encontradas na literatura. De acordo com Szekelly⁽⁹⁾, o fenômeno de transferência de massa ocorre em duas etapas: nas macroescalas de turbulência predominantemente por convecção e ao atingir as microescalas de turbulência por difusão. Para as microescalas, onde as forças viscosas são predominantes, tem-se:

$$N_{Re} = \frac{Dv^*}{\nu^*} = 1 \quad (1)$$

Onde v^* é a velocidade de escoamento no interior do redemoinho e α o coeficiente de transferência de momento por difusão na microescala, sendo α deduzida anteriormente por Asai et al.⁽²⁾, conforme apresentado na Tabela 2:

$$v^* \alpha \left[\frac{\frac{1}{\varepsilon^3 L}}{D^{\frac{2}{3}}} \right] \quad (2)$$

Substituindo a equação (2) em (1), Costa⁽¹⁾ obteve a seguinte equação:

$$v^* \alpha (DL^3 \varepsilon)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Baseando-se na analogia entre transporte de momento e massa, pode-se afirmar que tal equação representa um critério geral de transposição em processos controlados por difusão de massa e momento, na microescala de turbulência. Com dimensão de m²/s, o critério desenvolvido representa a própria difusividade no redemoinho.

Para que a reação química possa ocorrer, os reagentes devem, inicialmente, ser transportados para a frente de reação. Como tal transporte ocorre em duas etapas, qualquer critério deve levar em conta o tempo necessário para: primeiro, partindo da macroescala de turbulência (depende das dimensões do reator) até atingir a microescala e, segundo, o tempo necessário para a difusão desses microredemoinhos (função da taxa de dissipação de energia). Portanto, as dimensões do equipamento precisam ser também consideradas para que as diferenças de tempo gasto para se atingir a microescala de turbulência, nos dois casos, não sejam desprezadas.

Os valores do coeficiente de transferência de massa (k) em escala de laboratório podem ser determinados experimentalmente. Os valores de taxa da dissipação de energia nas duas escalas são também conhecidos. Assim, a transposição para

determinação de k na instalação industrial é diretamente proporcional à escala, que, no caso de uma planta de dessulfuração, deve ser corrigido levando em conta o peso de dessulfurante injetado por tonelada de gusa nos dois equipamentos. Assim, a evolução teor de enxofre ao longo do tratamento pode ser facilmente determinada.

Tal critério pode ser entendido como o resultado da seqüência de etapas, que envolvem o mecanismo de transferência dos reagentes, conforme descrito a seguir nas etapas I e II, anteriores à reação química propriamente dita, descrita na etapa III.

Etapa I - na macroescala de turbulência, onde as forças de inércia prevalecem ($Re > 1$), o processo é predominantemente convectivo; daí a dependência das dimensões do equipamento;

Etapa II - na microescala de turbulência, onde prevalecem as forças viscosas ($Re \leq 1$), o processo é predominantemente difusivo. Assim, o tempo para difusão dos reagentes irá depender do tamanho da microescala (diâmetro do redemoinho), daí a dependência da taxa de dissipação de energia.

Etapa III - sendo a cal o agente dessulfurante⁽¹⁰⁾, seu suprimento na frente de reação precisa ser considerado. Isso foi feito levando em conta o consumo de dessulfurante por tonelada de gusa de cada reator.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experiências Industriais na Aciaria 1

Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se lança de dois furos com 9 mm de diâmetro, rotação de 10 rpm e pressão nos vasos de 7 bar. De um modo geral, os resultados preliminares permitiram concluir que a lança rotativa é mais eficiente do que a convencional. Nos tratamentos realizados, obteve-se taxa de dessulfuração 18% maior, aumento de 71,9% para 84,9% e redução na queda de temperatura de 54,5%, de 20°C para 10,9°C. Além disso, verificou-se uma menor projeção de metal líquido. Tais resultados foram explicados em função de uma melhor distribuição das linhas de fluxo, como também verificado no modelo físico, o que proporciona uma redução de zonas mortas e faz com que o agente dessulfurante entre em contato com porções renovadas de gusa, tornando este processo mais eficiente.

4.2 Determinação do Coeficiente de Transferência de Massa

A Figura 2 apresenta a evolução do teor de enxofre em função do tempo de tratamento utilizando lança rotativa. Determinou-se o coeficiente de transferência de massa, para cada tratamento, com base nesses dados. De um modo geral, os coeficientes de transferência de massa calculados apresentam pequenas variações e, portanto, representam bem o processo. Essa pequena variação permite realizar simulação para teores de enxofre inicial superiores aos avaliados nesta experiência.

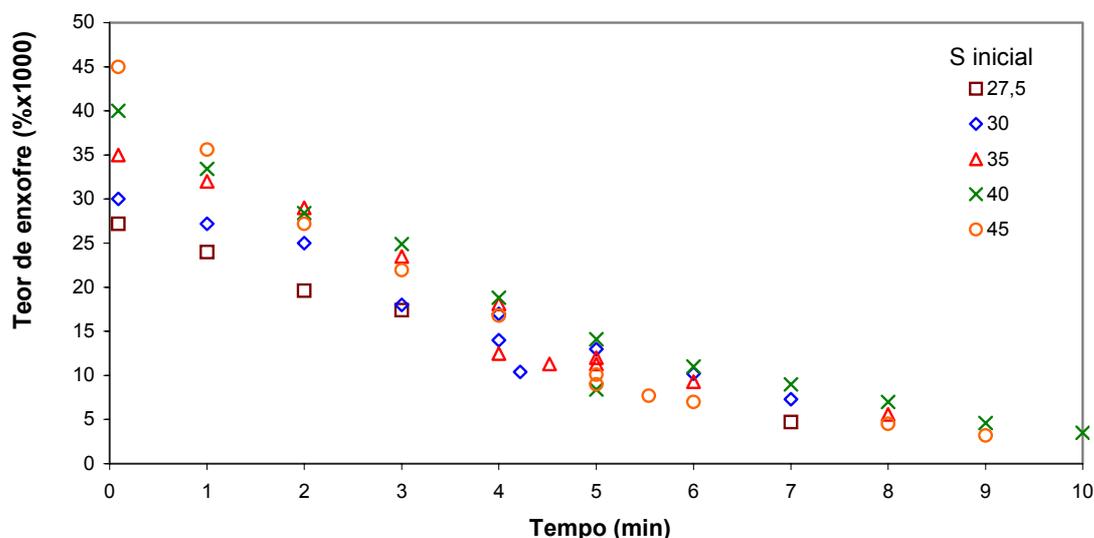


Figura 2. Evolução do teor de enxofre ao longo do tratamento.

4.3 Aplicação do Modelo de Transposição

A Figura 3 apresenta a validação do modelo de transposição proposto por Costa⁽¹⁾ para dessulfuração do gusa em carro-torpedo a partir de testes experimentais num forno atmosférico de indução de 100 kg. Pode-se ver uma concordância muito boa entre os valores teóricos e os experimentais. Pode-se ver ainda que em equipamentos como o carro-torpedo, a desconsideração do efeito das dimensões do equipamento, conforme Watanabe⁽⁵⁾ leva a um resultado muito diferente dos valores obtidos no tratamento industrial.

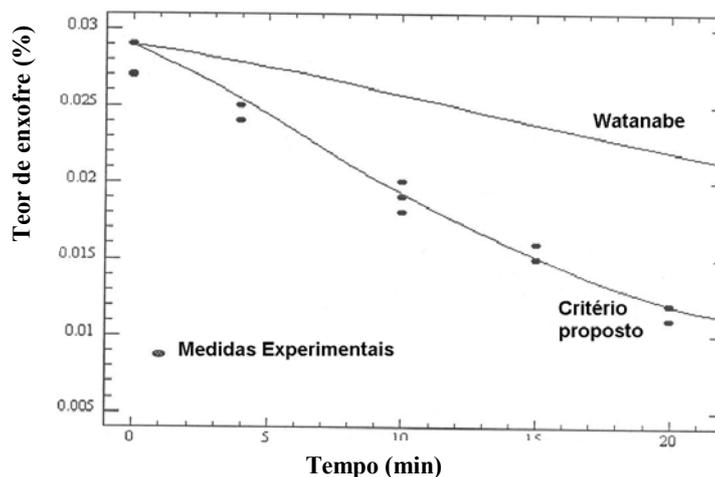


Figura 3. Evolução dos teores de enxofre no carro-torpedo – Critério proposto e Watanabe.

Os bons resultados obtidos na transposição para o carro-torpedo são a garantia da aplicabilidade do critério de transposição proposto. Efetuou-se sua transposição para uma planta de dessulfuração de gusa hipotética, conforme Tabela 3. Além desses dados, considerou-se os dados de simulação, conforme Tabela 1.

Tabela 3. Planejamento de simulações de transposição.

Simulações	Simulação I ($S_0 = 0,076\%$)			Simulação II ($S_0 = 0,037\%$)		
	1	2	3	1	2	3
Vazão (Nm^3/h)	60	90	120	60	90	120
Taxa de injeção Mg (kg/min)	10	15	20	10	15	20
Taxa de injeção cal (kg/min)	40	60	80	40	60	80
Consumo total de dessulfurante (kg)	50	75	100	50	75	100

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas três simulações, variando-se a taxa de injeção de material dessulfurante. Essas curvas de simulação permitem que se possa avaliar os benefícios que se obteria em caso de implantação da lança rotativa numa determinada planta industrial com diferentes taxas de injeção de material dessulfurante.

Um primeiro benefício seria para auxiliar no estudo de viabilidade técnica e econômica de aquisição de um dispositivo para implantação da lança rotativa. Nesse caso, ter-se-ia que simular a transposição utilizando dados da própria planta de dessulfuração de gusa e comparar com os resultados que se obtém com a lança convencional. Podendo-se, a partir daí, avaliar os benefícios previstos em termos de produtividade e de custos. O outro benefício seria o de buscar uma melhor condição de trabalho. Conforme apresentado nas referidas figuras, um aumento da taxa de injeção de dessulfurante de 50 kg/min para 75 kg/min apresenta um considerável incremento na velocidade de dessulfuração do gusa. No entanto, um novo aumento para 100 kg/min não se traduz em aumento semelhante. Pode-se ver ainda, a importância de se iniciar o tratamento de dessulfuração do gusa com teores de enxofre mais baixos para se obter os teores finais desejados em tempos menores e com um consumo menor de dessulfurante. Portanto, o modelo desenvolvido, pode também ser utilizado para propor alterações de parâmetros operacionais com vistas à otimização de processo de dessulfuração de gusa operando com lança rotativa.

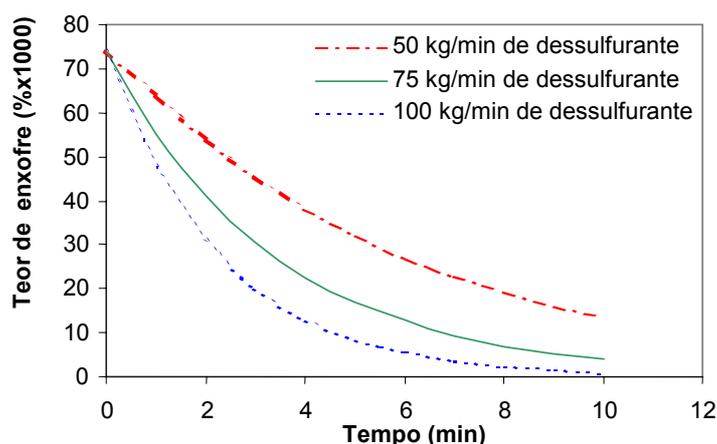


Figura 4. Evolução prevista pelo modelo de transposição ($S_0 = 0,076\%$).

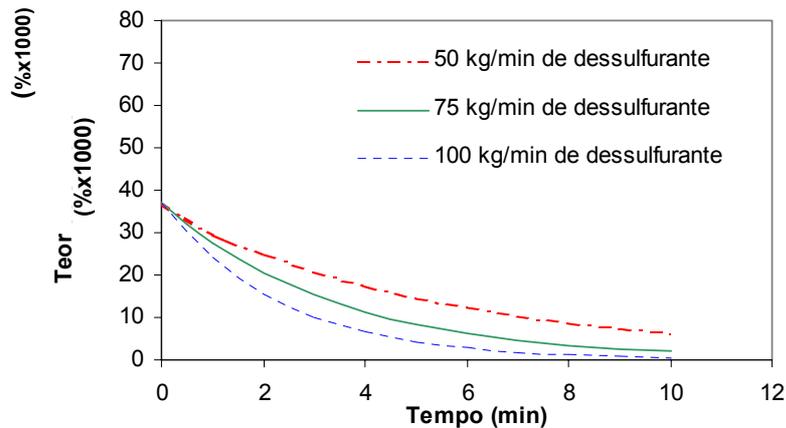


Figura 5. Evolução prevista pelo modelo de transposição ($S_0 = 0,037\%$).

CONCLUSÃO

A utilização da lança rotativa na Unidade de Dessulfuração de Gusa da Aciaria 1, proporcionou um aumento de 18% na taxa de dessulfuração, uma redução de 54,5% na queda de temperatura, uma redução de 25% no consumo de agentes dessulfurantes e uma redução no tempo de tratamento de 25%. Para uma mesma taxa de injeção e mesmo teor de enxofre visado, a redução do tempo de tratamento seria de 1,6 minutos. Tudo isso permitiria uma redução do consumo de agentes dessulfurantes de 396kg de cal para 317kg, de 88kg de magnésio para 70kg e de 8 minutos de tratamento para 6,4 minutos. Além disso, a lança rotativa promove uma operação mais segura, em termos de projeção de metal líquido.

A partir dos resultados experimentais com lança rotativa na Aciaria 1, determinou-se o coeficiente de transferência de massa que foi transposto para uma planta hipotética de dessulfuração de gusa, para se fazer uma série de simulações, válidas para lança rotativa.

O modelo de simulação utilizado nesse estudo pode ser aplicado para qualquer planta industrial de dessulfuração de gusa tanto para prever resultados com lança rotativa, sem avaliações experimentais prévias, quanto em estudos de otimização de plantas existentes.

REFERÊNCIAS

- 1 COSTA, S. L. S. Análise crítica de critérios para transposição de resultados de laboratório para a escala industrial em tratamentos de metal líquido. Tese de Doutorado, EEUFMG, 1996.
- 2 ASAI, S.; MUCHI, I. Mass transfer rate in ladle refining process. In: International Conference on Refining of Iron and Steel by Powder Injection. 3 rd SCANINJET. Luleå, Mefos, June. 1983. p. 12.1 - 12.29. part. 1.
- 3 NAKANISHI, K. Possible relationship between energy dissipation in steel processing operation. Ironmaking & Steelmaking. 2 (3): 173 – 197. 1975.

- 4 OHGUCHI, Y.; SAMBONGI, T. Kinetic study of the RH degassing process. In: MacMaster Symposium on ladle treatment of carbon steels. Canadá, MacMaster Academic Press; 1979.p:9.1 – 9.17.
- 5 WATANABE, Y. Comparison of mixing characteristics in botton blowing ladle LD converter and degassing process. Tetsu-to-Hagané. 69 (9): 1160 – 1765, 1983.
- 6 SANO, M.; MORI, K. Fluid flow and mixing characteristics in a gas-stirred molten metal bath. Transactions ISIJ. 23 (2); 169 – 175, February. 1983.
- 7 KITAMURA, S.; KITAMURA, T.; SHIBATA, T.; MIZUKAMI, Y. Effect of stirring energy temperature and flow composition on hot metal dephosphorization. ISIJ International. 31 (11): 1322 – 1328, 1991.
- 8 SKEKELLY, J. Fluid flow phenomena in metals processing. New York, Academic Press, 1979, 602 p.
- 9 SKEKELLY, J; THEMELIS, N. Rate phenomena in process metallurgy. New York, John Wiley & Sons, 1971,784p.
- 10 PRENAZZI, A.; COSTA, S.; VIANA, J. F. Otimização do tratamento de dessulfuração de gusa através de mistura CaO-Mg. In: XIX Seminário Coaço Coref. Belo Horizonte, 1999.