

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA AO ESTUDO DA FLOTAÇÃO DE INCLUSÕES EM AÇOS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Ângelo Máximo Fernandes Marins¹

Joaquim Gonçalves Costa Neto²

Wiclef Humberto Vieira Martins³

Carlos Antônio da Silva⁴

Itavahn Alves da Silva⁵

Resumo

A prática de injeção de gás inerte na panela de refino secundário do aço tem como propósito a remoção das inclusões não-metálicas, além da homogeneização térmica e composicional. Pela modelagem física de uma panela de refino secundário, são investigados os efeitos da vazão de gás inerte e número dos plugues porosos, instalados no fundo da panela. O campo de velocidades e a flotação de inclusões não-metálicas são analisados matematicamente via CFD. Os resultados obtidos por modelagem física e matemática são discutidos e validados por meio de análise de imagens (PIV) e o modelo macroscópico para prever a flotação das inclusões não metálicas é confrontado com os resultados industriais para análise da quantidade de inclusões para aços aplicados no setor automobilístico.

Palavras-chave: Refino secundário; Borbulhamento; Modelamento; Inclusão não-metálica.

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS APPLIED TO THE STUDY OF INCLUSIONS FLOTATION IN STEELS FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract

The practice of inert gas bubbling in steel refining ladle aims the removal of non-metallic inclusions, in addition to thermal and compositional homogenization. Through physical and mathematical models of a secondary ladle refining, the effects of bubbling flow of inert gas and the number of porous plugs located at the bottom of the ladle are investigated. The velocity fields and flotation of non-metallic inclusions are analyzed by physical and mathematical modeling. The results are validated by analysis of images (PIV) and the macroscopic model is compared by industrial results for inclusions analysis for steels used in the automotive sector.

Key words: Secondary refining; Bubbling; Modeling; Nonmetallic injection.

¹Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Engenheiro Processo de Aciaria da Arcelor Mittal Monlevade, Av. Getúlio Vargas, 100, Centro Industrial, Cep 35930-395, João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: angelo.marins@arcelormittal.com.br

²Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Dr., Gerente da Assistência Técnica à Clientes da ArcelorMittal Monlevade, Av. Getúlio Vargas, 100, Centro Industrial, Cep 35930-395, João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: joaquim.costa@arcelormittal.com.br

³Aluno de graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Campus do Morro do Cruzeiro, Bauxita, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: wiclefmartins@yahoo.com.br

⁴Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., PhD, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Campus do Morro do Cruzeiro, Bauxita, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: casilva@em.ufop.br

⁵Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., D.Sc. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Campus do Morro do Cruzeiro, Bauxita, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: itavahnufop@yahoo.com.br

I INTRODUÇÃO

A prática de borbulhamento de gás inerte, em painéis de refino secundário do aço, incentiva a cinética das reações químicas e dissolução de ligas, além de favorecer as homogeneizações térmica e composicional do banho, a flotação e captura de inclusões não metálicas. O campo de velocidades resultante da injeção de gás inerte é controlado por características da pluma que se forma acima do elemento injetor (Figura 1).

O tráfego das bolhas de gás inerte através do metal pode causar instabilidades na interface metal-escória, o que pode resultar em entranhamento de gotas de escória de cobertura e exposição do aço líquido à atmosfera (*olho da pluma*) (Figura 2a). A distribuição de velocidades e a distribuição de densidade de energia aportada ao aço líquido,

a partir das quais ocorre o entranhamento de escória no aço, dependem de geometria, número e arranjo dos pontos de borbulhamento do gás inerte (Figura 2b) além de vazão de gás inerte, nível de aço, volume e composição química da escória de cobertura.

O número de plumas (e o número de *olhos das plumas*) é igual ao número de pontos de borbulhamento do gás inerte na panela. Os *olhos da pluma* são locais de contaminação do aço por absorção de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio. Outro fenômeno relacionado à agitação excessiva, ou seja, agitação descontrolada com altas taxas de injeção de gás é a ocorrência de turbulência e/ou emulsificação na interface metal-escória, que deve ser evitada, já que esta propicia o arraste de gotas de escórias para o seio do aço, o que poderá resultar em prejuízos à limpeza deste último.

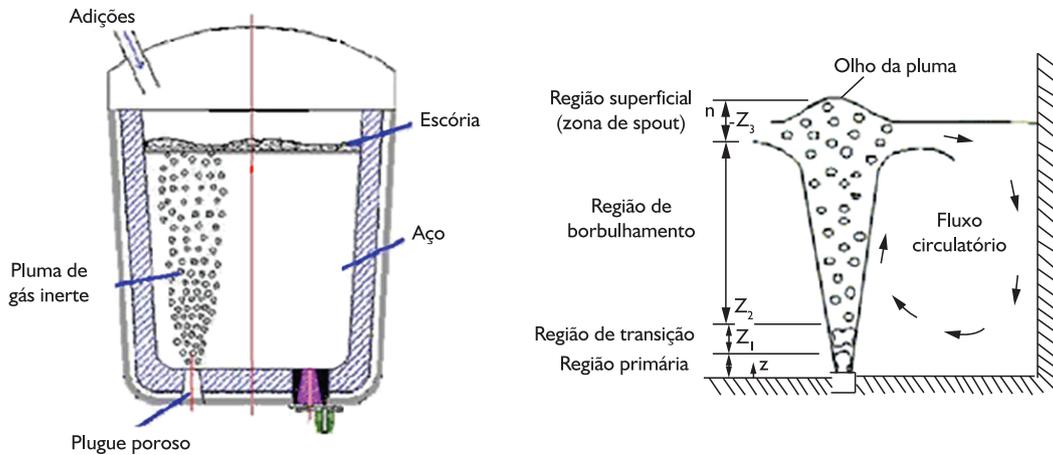


Figura 1. Fluxo circulatorio induzido pela pluma bifásica em uma panela de refino de aço.⁽¹⁾

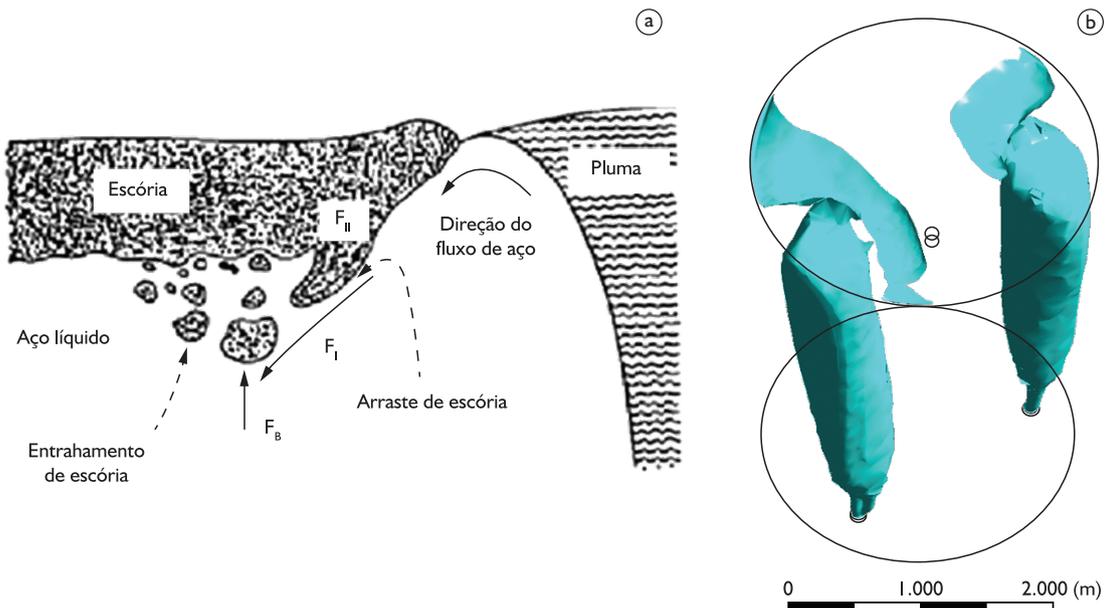


Figura 2. a) Arraste de escória para o seio do metal; b) Simulação fluidodinâmica dos fluxos gerados por duas plumas bifásicas em uma panela de refino de aço.⁽²⁻⁴⁾

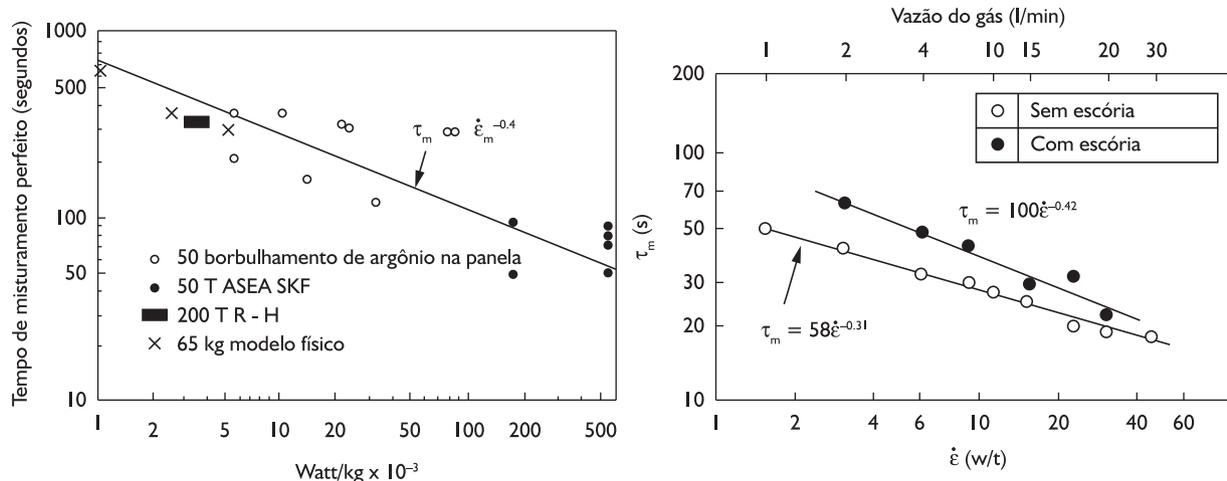


Figura 3. Influência da taxa de dissipação de energia e presença de escória sobre o tempo de misturamento do aço líquido na panela de refino secundário.^(5,6)

Madan, Satish e Mazumdar⁽⁷⁾ mencionam que o tempo de misturamento do aço, τ_m [s], definido como o tempo necessário para que a concentração atinja 95% da concentração nominal, ou ainda, que as flutuações em composição se estabilizem dentro da faixa de 5% de erro em relação à concentração nominal, em panelas operadas com múltiplos pontos de borbulhamento de gás inerte pode ser estimado pela correlação (Equação 1):

$$\tau_m = 8,52 \varepsilon_m^{-0,33} N^{0,33} \quad (1)$$

onde ε_m [W/kg] e N [---] representam, respectivamente, a energia de agitação e o número de pontos de borbulhamento de gás inerte pelo fundo da panela. Patil et al.,⁽⁸⁾ entre outros, reportam que o tempo de misturamento do aço decresce com o aumento da taxa de dissipação de energia e com a presença de uma camada de escória de cobertura (Figura 3).

Este trabalho trata da influência de variáveis operacionais, como vazão de gás e disposição de injetores sobre o grau de limpeza inclusionária obtida em uma estação de tratamento secundário de aço (rinsagem) e da modelagem numérica do processo de flotação e separação de inclusões não-metálicas durante o borbulhamento de gás inerte para o aço SAE9254 + Al, utilizado na fabricação de molas para suspensão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A estratégia utilizada é aplicar a modelagem no processo de flotação e separação de inclusões não-metálicas durante o processo de injeção de gás inerte, por meio da avaliação da taxa de dissipação de energia específica do sistema - ε , como função de alguns parâmetros operacionais, tais como: vazão de gás, geometria da panela; número e posição dos plugues porosos, a partir de

Tabela 1. Características do processo de injeção de gás na ArcelorMittal Monlevade

Parâmetro	Valor de referência	Unidade
Capacidade da panela	125	t
Altura de coluna de aço	3.490	mm
Diâmetro da panela	2.600	mm
Vazão de gás	14 a 70	Nm ³ /h
Número de plugues	01	---
Posição do plugue	780 × 450	mm
Tipo de plugue	12 aletas de injeção	

um procedimento numérico via *Computational Fluid Dynamics* – CFD, validado pelo modelo físico da panela de aço da ArcelorMittal Monlevade.

Para a investigação dos efeitos de parâmetros operacionais, tais como número de plugues para injeção de gás e vazão de gás inerte sobre o fluxo de aço líquido no interior da panela e, por conseguinte, na remoção de inclusões não-metálicas, foi construído um modelo em acrílico, em escala 1:5 (com $\lambda = 0,2$ razão entre o Comprimento Característico do Modelo e o Comprimento Característico Análogo, no Protótipo) da panela industrial da ArcelorMittal Monlevade, cujas especificações são apresentadas na Tabela 1. Nos experimentos, foram utilizados água para simular o aço e ar para simular o argônio. Este modelo é utilizado para simulações das condições de trabalho desta usina, além de servir de suporte para validação da simulação computacional.

Com o objetivo de determinar os tempos de mistura, a montagem experimental compreendeu medição contínua de vazões dos gases, condutividade do meio aquoso e transferência, via placa de aquisição de dados A/D, variação da condutividade com o tempo para um arquivo de computador (Figura 4).

A determinação do tempo de mistura consiste na análise da dispersão de um traçador (KCl) que é injetado na forma de pulso. A Figura 5 mostra as posições de adição do traçador de KCl, as posições dos pontos de borbulhamento de gás inerte e de medidas de condutividade da fase utilizada para simular o aço (água).

A distância dos plugues porosos ao centro da panela (X_1 e X_2) e o ângulo entre eles (θ) são ilustrados na Figura 6. O valor escolhido, $\theta = 135^\circ$, justifica-se de acordo com Zhang e Thomas,⁽⁹⁾ que relatam ser a melhor

configuração para a diminuição de zonas mortas dentro da panela. Os autores concluem que a distância entre eles e o ângulo entre os dois plugues exerce um efeito importante sobre o fluxo.

Respeitada a similaridade geométrica, determinaram-se as vazões de borbulhamento do gás inerte no modelo e no protótipo, tais como mostradas na Tabela 2. O critério de similaridade indica como relação entre as vazões de gás, expressa pela Equação 2:⁽¹⁾

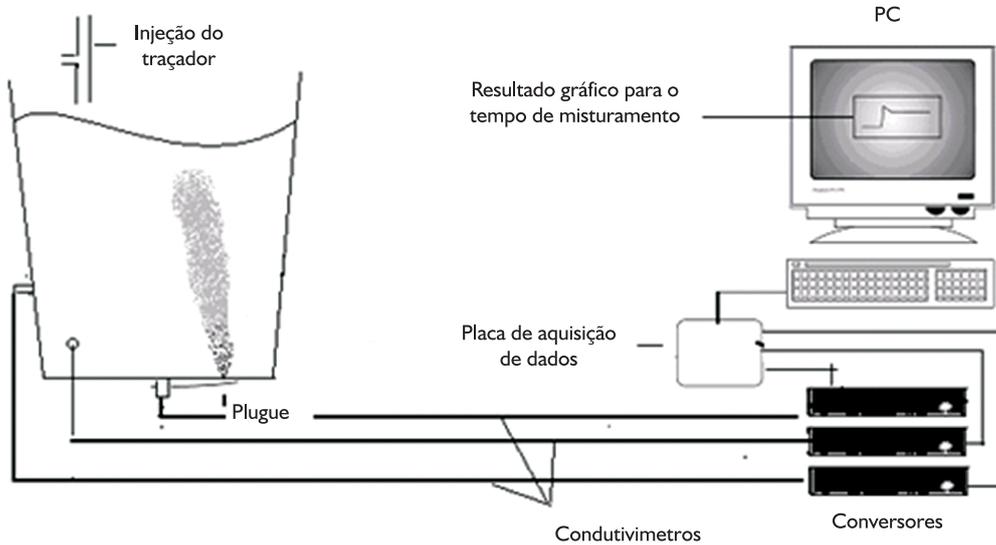


Figura 4. Esquema da montagem experimental no Laboratório de Pirometalurgia do Demet/UFOP.⁽⁴⁾

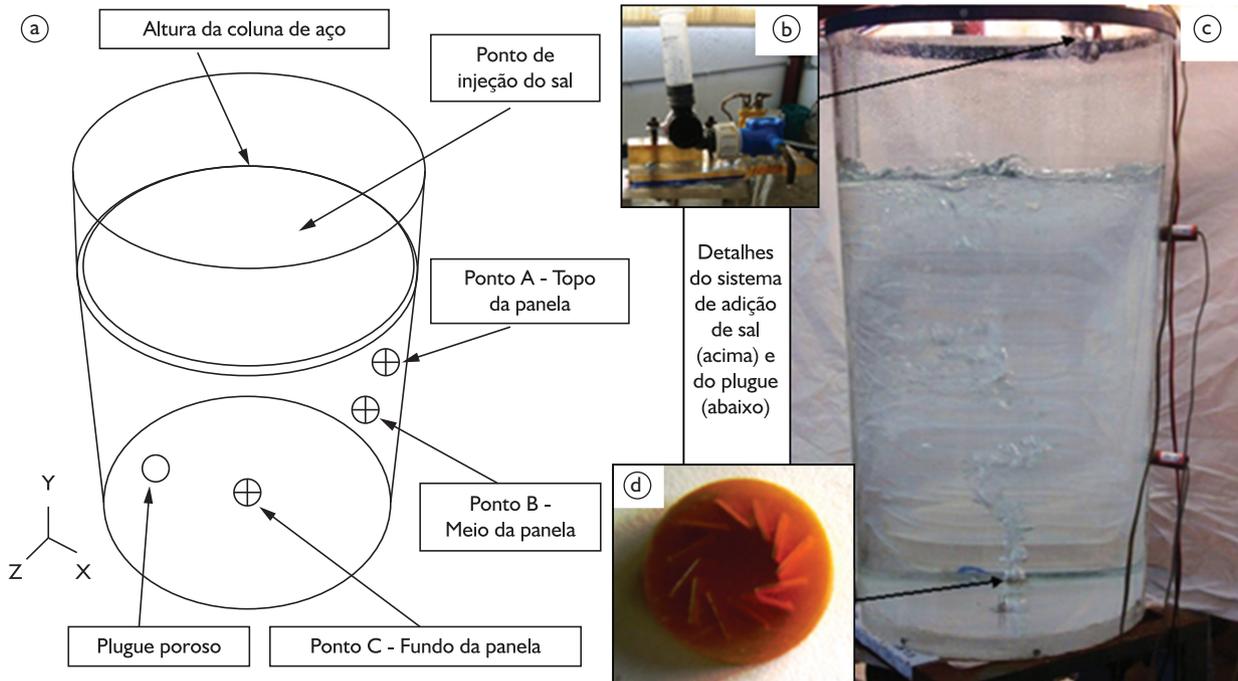


Figura 5. Esquema da montagem experimental. a) posicionamento dos pontos de aquisição de dados; b) detalhe do sistema de injeção de sal; c) foto da panela em acrílico em escala 1:5 e d) detalhes do plugue de injeção de ar.⁽⁴⁾

$$Q_{\text{modelo}} = \lambda^{2,5} Q_{\text{industrial}} \quad (2)$$

Foi construído um modelo matemático do fluxo de líquido na panela – utilizando o software CFX da ANSYS® - que é baseado na geometria do modelo físico proposto anteriormente. Os campos de velocidade do escoamento gás-água são resolvidos em *regime permanente*. A validação do modelo matemático envolve a comparação entre velocidades médias, medidas em regiões pré-determinadas, no modelo matemático e no modelo físico via *Particle Image velocimetry* (PIV).

Do modelo matemático são utilizados os valores da taxa de dissipação de energia turbulenta – ε , como valor de entrada para os cálculos do balanço macroscópico para remoção de inclusões. Resultante deste modelo, são apresentados, também, perfis de velocidade para cortes geométricos específicos.

De modo a descrever os resultados experimentais, evidenciados pela amostragem de oxigênio total e análise das inclusões via MEV, foi construído um modelo para a avaliação do mecanismo de coalescimento e flotação de inclusões não-metálicas ao longo do processo de agitação com injeção de gás. Esse modelo leva em consideração os mecanismos de Saffman e Turner⁽¹⁰⁾ e de Stokes, de choque

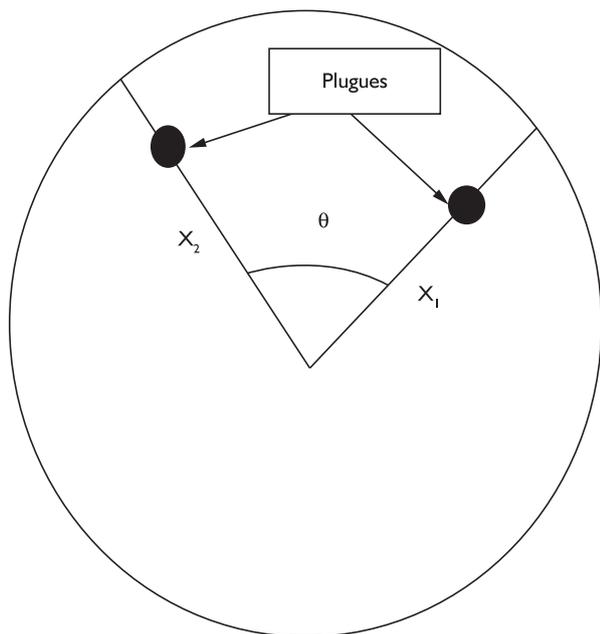


Figura 6. Posicionamento dos pontos de borbulhamento no fundo da panela em acrílico.⁽⁴⁾

Tabela 2. Relação entre vazões de gás para Protótipo e Modelo

Vazão protótipo (Nm ³ /h)	Vazão modelo (Nm ³ /h)	Vazão modelo (L/min)
16,76	0,30	5
33,55	0,60	10
67,08	1,20	20

entre inclusões empregando variáveis macroscópicas do processo, como taxa de dissipação de energia – ε , e vazão de gás. Detalhes dos procedimentos de amostragem de inclusões e do modelo de flotação podem ser encontrados em Marins.⁽⁴⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Validação do Modelo Numérico

O modelo matemático do fluxo de aço líquido na panela utiliza como dados de entrada os diâmetros das bolhas e não prevê choque e coalescimento das mesmas. Essa hipótese, apesar ser limitante para aplicação ao aço, é necessária para a redução de complexidade dos cálculos computacionais. Embora possa haver remoção de inclusões não-metálicas pela captura das mesmas pelas bolhas, este mecanismo não foi levado em consideração.

Para a validação do modelo computacional, são utilizados os campos de velocidades do fluido comparando-os com o modelo físico em escala 1:5. Com finalidade exclusiva de determinar o campo de velocidades do fluido para o modelo físico em acrílico, mediu-se o tamanho das bolhas, na região da pluma, por meio da análise de imagem das mesmas, via o software *Vistamatrix*. O diâmetro de bolha d_b (cm), tal como mostrado no histograma da Figura 7, é a média aritmética das 50 medidas realizadas em cada vazão.

A Figura 8 apresenta a correlação para a velocidade média do fluxo de água, no modelo em acrílico, entre os valores medidos via metodologia PIV (técnica não intrusiva de medição de velocidades, aplicável em fluidos transparentes, para fins de pesquisa e diagnóstico e problemas envolvendo fluxos) e os valores calculados na simulação numérica para o modelo aquoso, via CFX. Além do perfil para os campos de velocidade do fluido, a correlação entre os vetores de velocidade consolida a validação do modelo numérico com o modelo físico em escala 1:5.

3.2 Tempo de Mistura ou Homogeneização

A eficiência na homogeneização do banho, com consequente redução do tempo de mistura, após iniciada a etapa de borbulhamento de gás inerte, é função da energia de agitação provocada pelo fluxo de gás, que define a estrutura de fluxos do aço na panela, que por sua vez é dependente de alguns fatores analisados neste trabalho, como vazão do gás, número e disposição dos plugues porosos. A Figura 9 evidencia a redução da região “morta” ou de baixa recirculação do líquido, em frente à pluma e na região inferior do vaso, quando a vazão de gás aumenta.

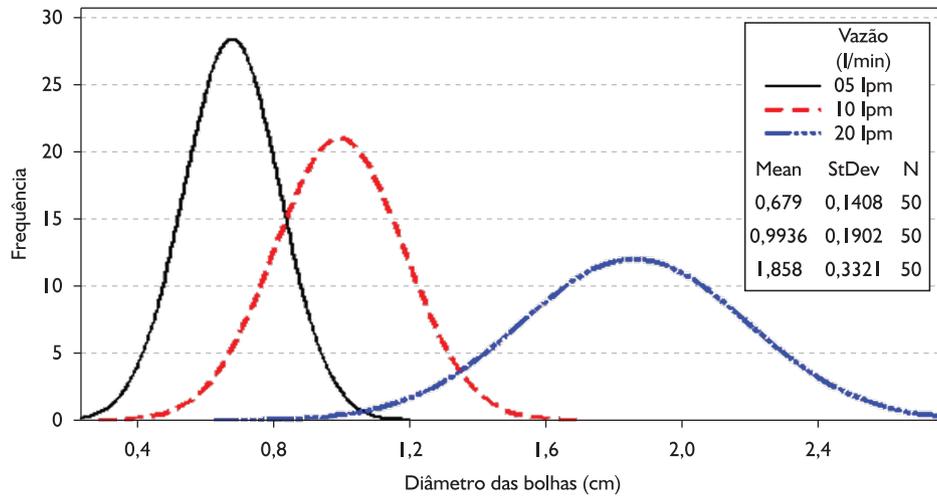


Figura 7. Histograma para a distribuição do tamanho de bolhas nas filmagens.⁽⁴⁾

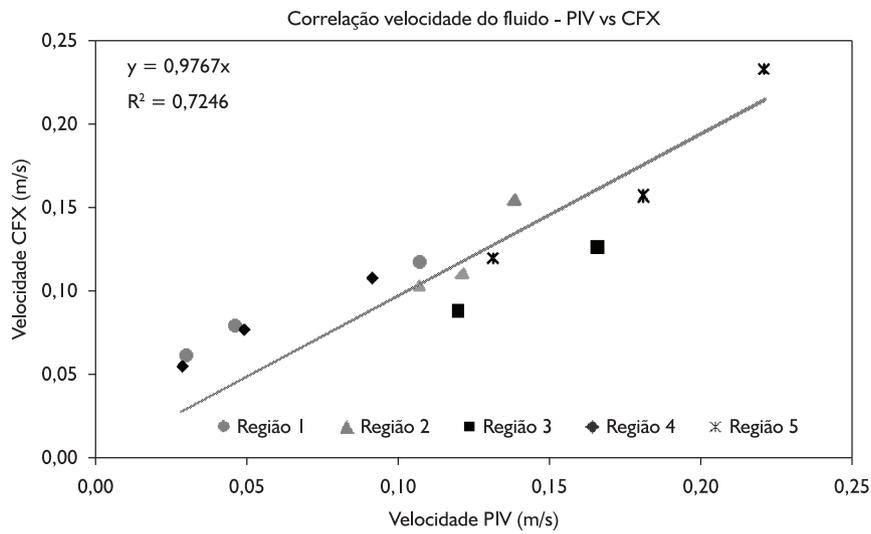


Figura 8. Correlação entre as velocidades médias nas regiões 1; 2; 3; 4 e 5, para as metodologias PIV vs CFX.⁽⁴⁾

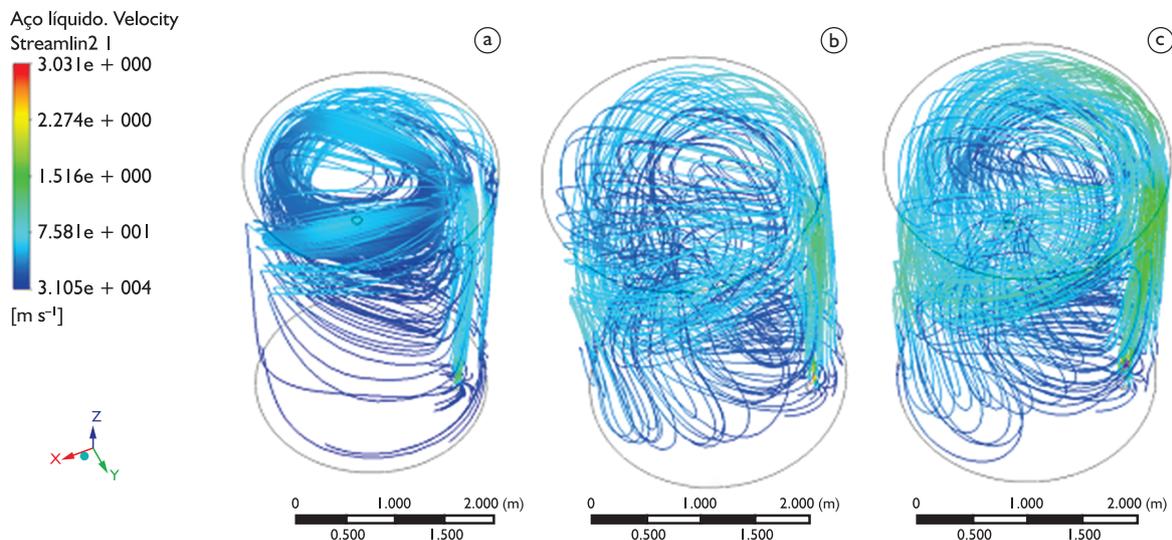


Figura 9. Distribuição das Linhas de Velocidade do Fluido responsáveis pela homogeneização do banho no aço líquido na panela de refino. Simulação numérica da condição industrial via CFX. Vazões: a) 16,7 N.m³/h; b) 33,5 N.m³/h e c) 67,1 N.m³/h.⁽⁴⁾

As Figuras 10 e 11 mostram que o tempo de misturamento do banho, obtido por meio das medidas feitas no modelo em acrílico, em painéis agitadas por borbulhamento de gás inerte, varia com a densidade de energia e número de pontos de borbulhamento. O tempo de misturamento do aço, em uma panela dotada de dois plugues porosos, para uma mesma taxa de dissipação de energia, mostra-se menor do que aquela dotada de um plugue. Esta redução vai de 6% para vazões mais altas e até 10% para menores vazões de gás, considerando as mesmas condições (volume de aço) na panela - Figura 11.

Para a configuração de dois plugues porosos no fundo da panela, a um ângulo de 135°, a eficiência da homogeneização do banho, com redução do tempo de mistura e diminuição das zonas de baixa recirculação do fluido, mostra-se superior a de uma panela com um único plugue poroso. Este resultado concorda com os encontrados nos trabalhos de Zhang e Thomas.⁽⁹⁾

3.3 Modelo Macroscópico – Previsão da Flotação de inclusões

Um dado relevante no experimento industrial é o valor do Oxigênio Total, que representa uma medida indireta da quantidade de inclusões não-metálicas no aço líquido. Neste trabalho, o método utilizado para retirada de amostras para análise do percentual de oxigênio total é o amostrador tipo TOS (*Total Oxygen Sampler*). Da aplicação dessa técnica pode-se determinar a evolução do Oxigênio Total do aço líquido, durante a operação de rinsagem, para diferentes vazões de borbulhamento de gás inerte (Figura 12), que também apresenta a previsão do modelo macroscópico de choque, coalescimento e flotação de inclusões não-metálicas. Confrontado com os dados industriais, este modelo apresenta a melhor coerência, quando aplicado à condição de vazão de 33,5 N.m³/h. Tal modelo considera a atuação de dois mecanismos, que, neste caso,

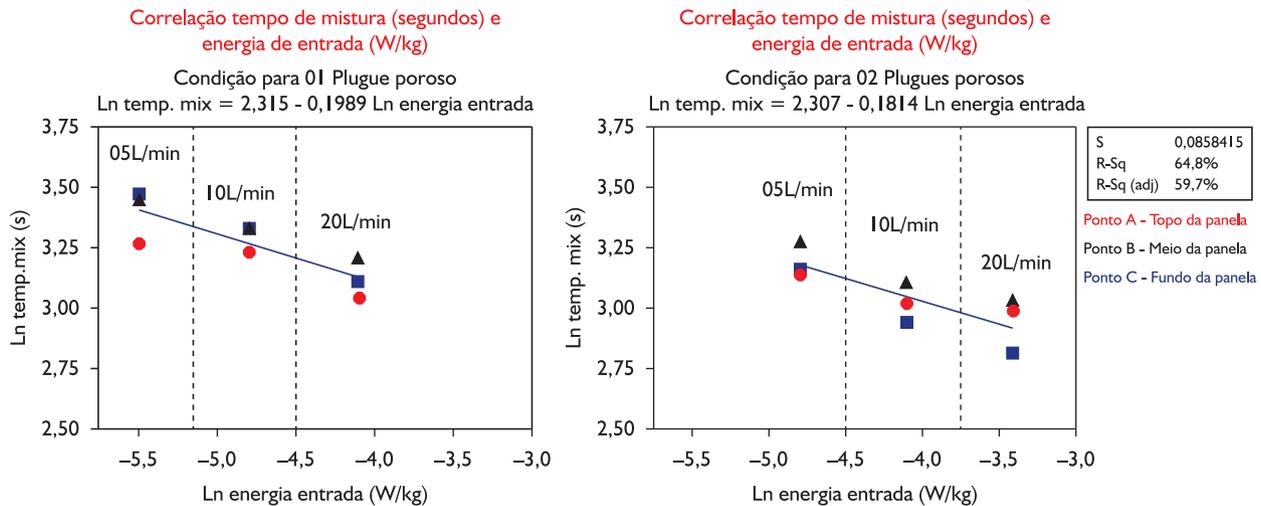


Figura 10. Influência da taxa de aporte de energia sobre o tempo de misturamento do aço em panela de refino, condições: um e dois plugues porosos.⁽⁴⁾

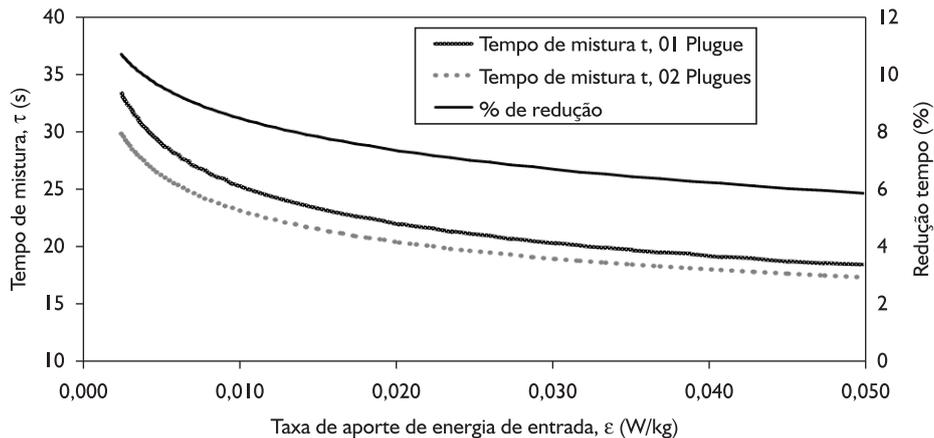


Figura 11. Efeito da energia de agitação sobre o tempo de misturamento do aço em panela de refino, condições: um e dois pontos de borbulhamento de gás inerte.⁽⁴⁾

são: β_1 (mecanismo de Stokes ou diferença de velocidade) descrito pela Equação 3 e β_2 (mecanismo de agitação ou de Saffman e Turner,⁽¹⁰⁾ expresso na Equação 4:

$$\beta_1(v_i, v_j) = \pi(R_i - R_j)^2 |v_i - v_j| \quad (3)$$

$$\beta_2(v_i, v_j) = \alpha_T 1,3(R_i - R_j)^3 \left(\frac{\varepsilon}{\mu/\rho}\right) \quad (4)$$

Para simular matematicamente o processo de remoção de inclusões não-metálicas do aço na panela, mostrado na Figura 13, durante o borbulhamento de argônio, consideram-se os mecanismos de Saffman e Turner e de Stokes, de choque entre inclusões empregando variáveis macroscópicas do processo, como a taxa específica de aporte de energia ao sistema, ε [W/kg] calcu-

lada via técnica CFD, apresentada na Figura 15, que é um dos *inputs* para o modelo, junto com o valor para o oxigênio total.

A Tabela 3 apresenta quantidade de amostras de corridas do aço SAE 9254+Al, retiradas ao longo do processo de metalurgia de panela, ou etapa de injeção de gás.

Tabela 3. Definição da população amostral para análise de inclusões não-metálicas

Vazão (Nm ³ /h)	Número amostras/corrida	Número corridas SAE 9254 + Al	Total
16,7	5	3	15
33,5	5	3	15
67,1	5	3	15
Total de amostras			45

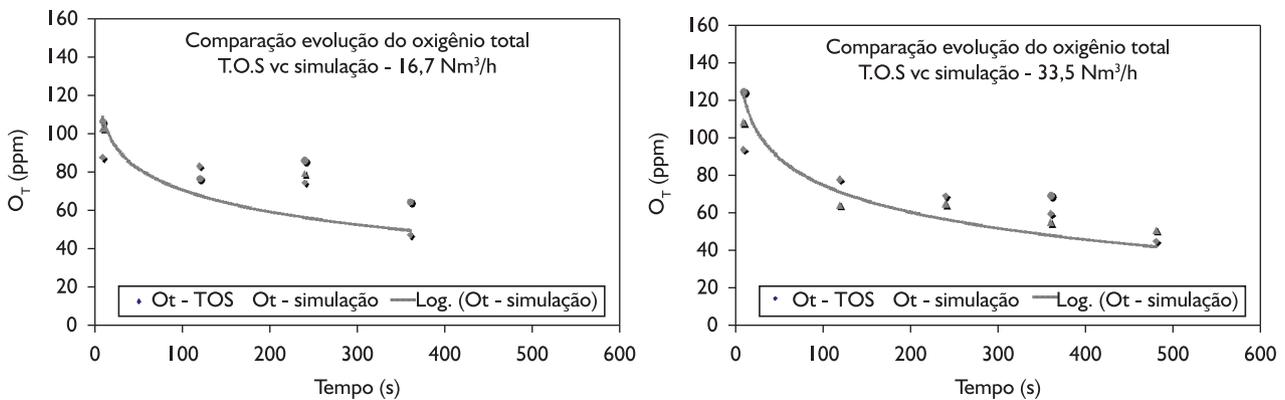


Figura 12. Previsão do Modelo Macroscópico para Choque e Coalescimento de Inclusões para a evolução das análises de Oxigênio Total. As linhas cheias resultam do modelo macroscópico de choque e coalescimento de inclusões, empregando-se constante de Saffman & Turner igual a 1×10^{-4} . Os pontos são provenientes dos resultados de corridas industriais para as análises de T.O.S.,⁽⁴⁾ onde t=0 representa fim de vazamento da corrida.

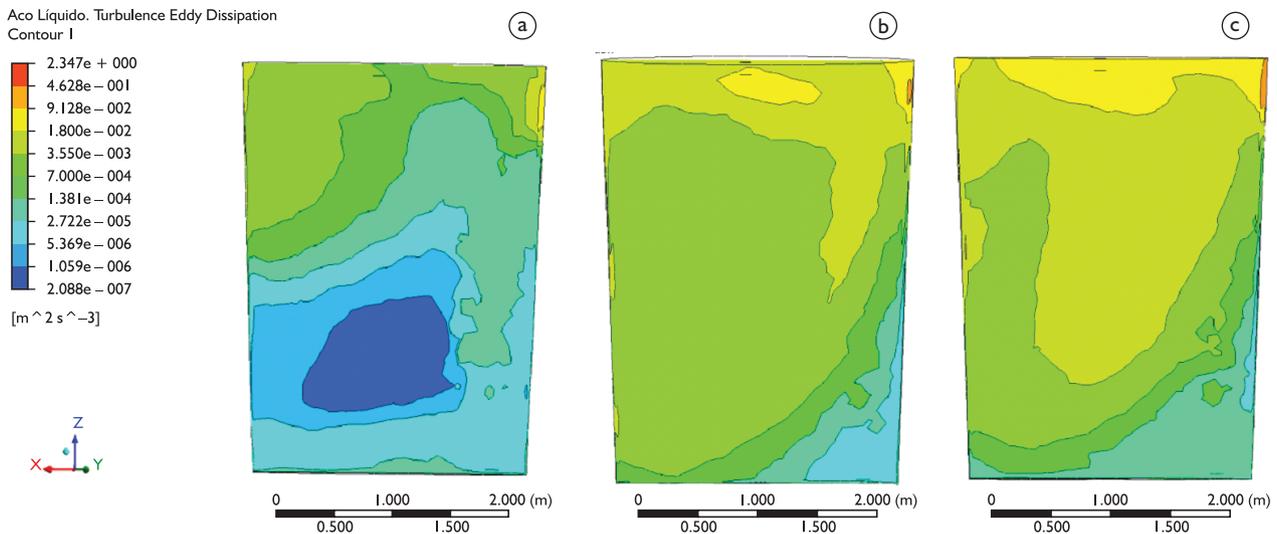


Figura 13. Perfil para Taxa Específica de Aporte de Energia ao Sistema ε [W/kg]. Simulação numérica da condição industrial. Vazões: a) 16,7 N.m³/h; b) 33,5 N.m³/h e c) 67,1 N.m³/h.⁽⁴⁾

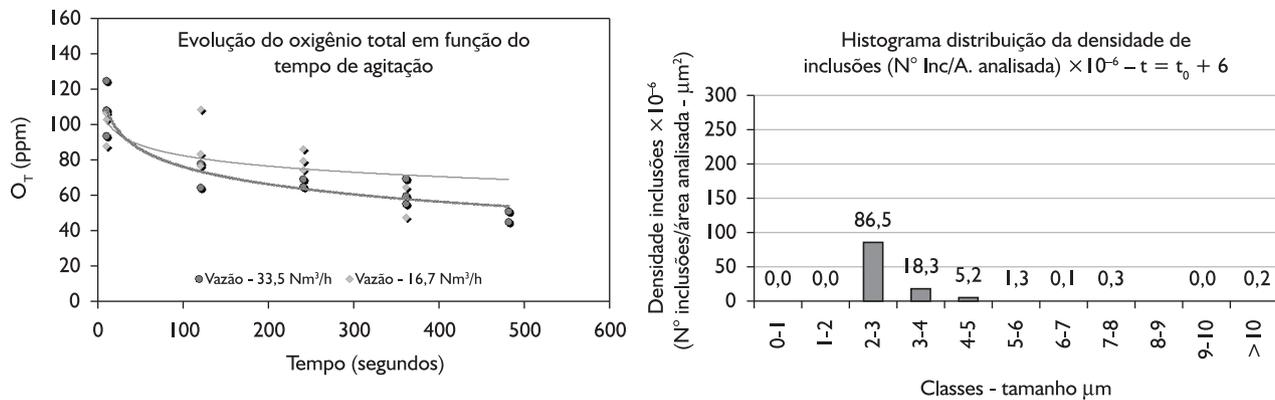


Figura 14. Variação do oxigênio total com o tempo de borbulhamento de gás inerte para duas vazões.⁽⁴⁾ Histograma de Distribuição de inclusões – Vazão de 33,5 $N.m^3/h$.⁽⁴⁾

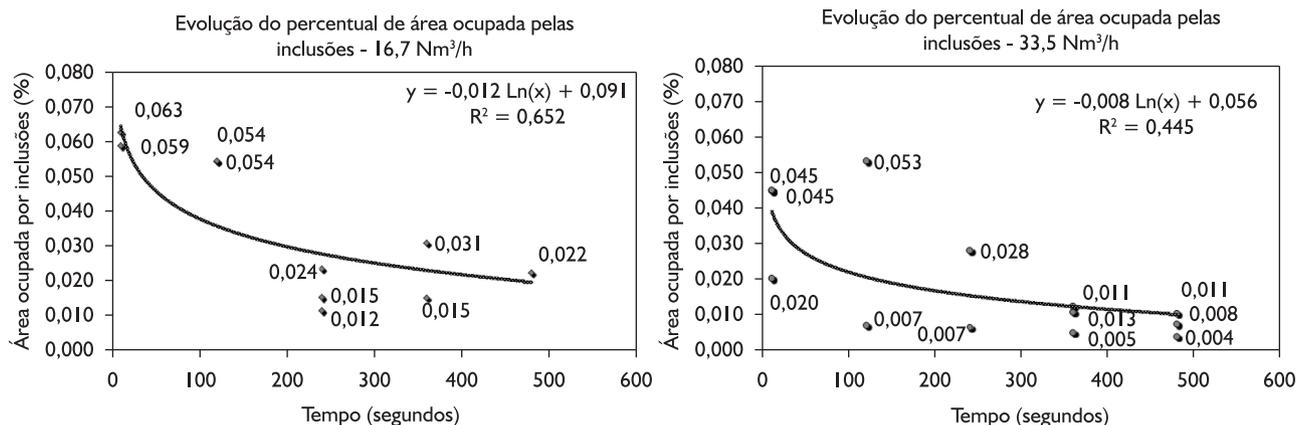


Figura 15. Evolução da área ocupada pelas inclusões com o tempo de Rinsagem para duas vazões do gás inerte 16,7 Nm^3/h e 33,5 $N.m^3/h$.⁽⁴⁾

3.4 Flotação de Inclusões

A Figura 14 mostra a evolução do oxigênio total, em função da vazão de borbulhamento de gás inerte. Fica evidenciado que o aumento da taxa de borbulhamento de gás inerte implica na remoção das inclusões não-metálicas do aço. Este efeito pode ser atribuído ao aumento da taxa de dissipação de energia; aumento da energia de choque entre as partículas inclusionárias nas imediações da pluma e também pelo aumento da superfície de contato metal-bolha. No entanto, deve-se ressaltar que o aumento da vazão do gás inerte deve ser limitado pelas condições de desenvolvimento da emulsificação da escória e aumento do olho da pluma. Este último fator poderá causar a reoxidação e contaminação por outras espécies indesejáveis no aço, durante o período de rinsagem. Por este motivo, não foi possível, durante a experimentação industrial, a coleta de amostras na vazão de gás de 67,1 $N.m^3/h$, evidenciada, na simulação numérica, pela grande turbulência na interface metal escória, com consequente exposição do banho à reoxidação.

O histograma para a distribuição do tamanho das inclusões (avaliações feitas via análises pela técnica MEV) sugere uma maior quantidade de inclusões de tamanho menor, até 10 μm^2 , quando se trabalha com uma vazão de

gás de 33,5 $N.m^3/h$ (79,2% das inclusões encontradas têm área menor que 10 μm^2), além de uma diminuição de 27% nas inclusões maiores que 100 μm^2 .

O aumento na efetividade de remoção das inclusões não metálicas com o aumento da vazão de gás também é confirmado pela avaliação do percentual da área ocupada pelas inclusões, nas análises via MEV, para as mesmas amostras utilizadas para a avaliação da concentração (em ppm) de Oxigênio Total. A Figura 15 apresenta a evolução da área ocupada pelas inclusões em função do tempo de injeção de gás, para as condições de vazão de 16,7 $N.m^3/h$ e 33,5 $N.m^3/h$.

4 CONCLUSÕES

- A região de menor intensidade de agitação da panela (zona morta) desenvolve-se no fundo da panela para injeção com um plugue; com a presença de dois plugues essa zona é minimizada;
- Para o caso de um plugue poroso, o aumento da taxa de borbulhamento de gás inerte de 5 L/min para 20 L/min resulta na redução de 24% do tempo de mistura;

- Para o caso de dois plugues porosos, para o arranjo considerado, a região de maior estado de turbulência, durante o processo de rinsagem, ocorre no topo da panela (interface metal-escória), indicando, na prática industrial, maiores oportunidades de reoxidação do aço;
- Para as condições operacionais investigadas industrialmente, a vazão de 33,5 N.m³/h parece ser a mais conveniente, pois implica em um baixo valor para o tempo de mistura, além de não promover a formação de um olho de pluma de tamanho excessivo, o que levaria à oxidação do banho metálico;
- Uma distribuição assimétrica nas vazões de entrada de gás para agitação do aço líquido mostra-se mais eficiente para um mesmo consumo de gás, com redução de 9% no tempo de mistura ou de homogeneização;
- A respeito da eficiência da rinsagem na remoção de inclusões, para a vazão de 33,5 N.m³/h, os dados sugerem que os benefícios conseguidos com o maior aporte de energia fornecido ao sistema compensam os efeitos deletérios de uma pequena turbulência na interface metal/escória na região de abertura do “olho”;
- A simulação computacional mostra-se um método confiável (depois de realizada a validação do modelo), seguro e prático para simular este processo industrial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ArcelorMittal Monlevade e à Redemat/UFOP, pelo apoio irrestrito a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 MAZUMDAR, D.; EVANS, J. W. Macroscopic models for gas stirred ladles. *ISIJ International*, v. 44, p. 447-462, Mar. 2004. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.44.447>
- 2 MAZUMDAR, D.; GUTTHRIE, R. I. L. The physical and mathematical modelling of gas stirred- ladle system. *ISIJ International*, v. 35, p. 1-20, Jan. 1995. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.35.1>
- 3 MIETZ, J.; SCHNEIDER, S.; OETERS, F. Model experiments on mass transfer in ladle metallurgy. *Steel Research*, v. 62, n. 1, p. 1-9, Jan. 1991.
- 4 MARINS, A. M. F. *Modelagem física e computacional do fluxo de aço em panela com agitação por gás inerte, com ênfase na separação de inclusões*. 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Rede Temática em Engenharia de Materiais - Redemat, da Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.
- 5 COSTA, A. L.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 3. ed. São Paulo: Blücher, 2010.
- 6 HAIDA, O. et al. Scaninject II In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INJECTION METALLURGY, 2., 1980, Lulea, Sweden. *Proceedings...* [S.l.]: Mefos, 1980. p. 15-25.
- 7 MADAN, M.; SATISH, D.; MAZUMDAR, D. Modeling of mixing in ladles fitted with dual plugs. *ISIJ International*, v. 45, p. 677-85, May 2005. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.45.677>
- 8 PATIL, S. P. et al. Mixing models for slag covered, argon stirred ladles. *ISIJ International*, v. 50, p. 1117-1124, Aug. 2010. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.50.1117>
- 9 ZHANG L.; THOMAS B. G. Evaluation and control of steel cleanliness: review. In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 85., 2002. Warrendale: ISS-AIME, 2002. p. 431-52.
- 10 SAFFMAN, P. G.; TURNER J. S. On the collision of drops in turbulent clouds. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 1, n. 1, p. 16-30, May 1956. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112056000020>

Recebido em: 14/09/2012

Aceito em: 18/02/2013