



MODELAGEM FÍSICA E COMPUTACIONAL DO FLUXO DE AÇO EM UMA PANELO AGITADA POR GÁS INERTE¹

Ângelo Máximo Fernandes Marins²
Wiclef Humberto Vieira Martins³
Carlos Antônio da Silva⁴
Itavahn Alves da Silva⁵
Varadarajan Seshadri⁶

Resumo

A prática de borbulhamento 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. Através de modelagem física de uma panela de refino secundário, os efeitos da vazão de borbulhamento do gás inerte e número dos plugues porosos, instalados no fundo da panela, foram investigados. O campo de velocidades e a flotação de inclusões não-metálicas foram 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 de inclusões não metálicas, confrontado com os resultados industriais para análise da quantidade de inclusões.

Palavras-chave: Refino secundário; Panela; Borbulhamento de argônio; Modelagem física; Modelagem matemática; análise de inclusões

PHYSICAL AND COMPUTATIONAL MODEL OF STEEL FLOW IN A LADLE STIRRED BY INERT GAS

Abstract

The practice of inert gas bubbling in steel refining ladle has as its purpose removal of non-metallic inclusions, in addition to thermal and compositional homogeneity. 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 were investigated. The velocity fields and flotation of non-metallic inclusions were analyzed. The results obtained by physical and mathematical modeling are discussed and validated by analysis of images and the macroscopic model was confronted with industrial results for inclusions analysis.

Key-words: Secondary refining; Ladle; Argon bubbling; Physical and mathematical modeling; Inclusion analysis.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro da ArcelorMittal, Monlevade e Mestrando da REDEMAT, UFOP, angelo.marins@arcelormittal.com.br,

³ Aluno de graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP wiclefmartins@yahoo.com.br,

⁴ MSc, PhD, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP- casilva@em.ufop.br,

⁵ MSc, DSc. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP - itavahnufop@yahoo.com.br,

⁶ Dr. Ing. Professor Emérito do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG. seshadri@demet.ufmg.br



1 INTRODUÇÃO

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

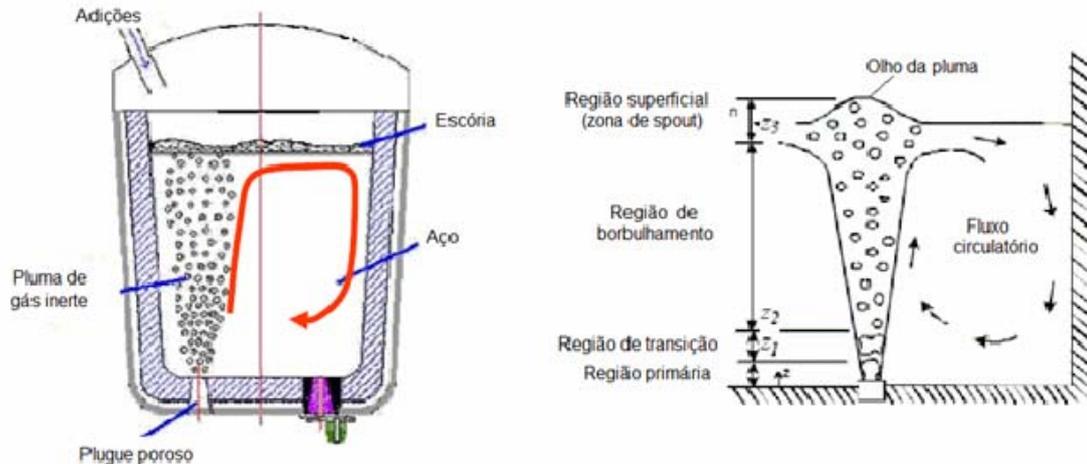


Figura 1 – Fluxo circulatório induzido pela pluma bifásica em uma panela de refino de aço.⁽¹⁾

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

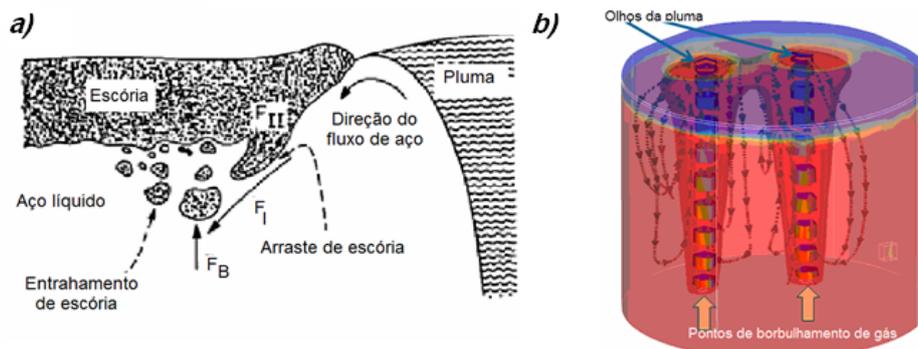


Figura 2– a) Arraste de escória para o seio do metal; b) Vista dos fluxos gerados por duas plumas bifásicas em uma panela de refino de aço.^(2,3)

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. Por isso, é importante o controle da vazão de gás para inibir a ocorrência da emulsão metal-escória (Figura 3), e arraste de gotas de escórias para o seio do aço, o que poderá resultar em prejuízos à limpeza deste último.

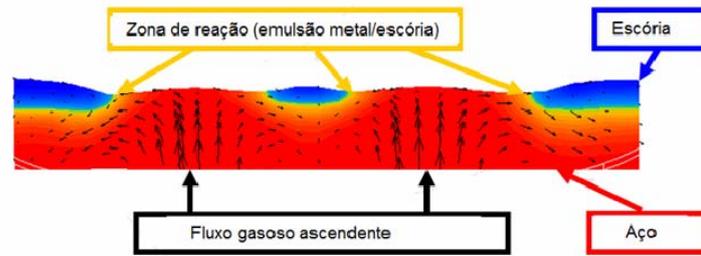


Figura 3 – Desenvolvimento de emulsão escória/metal nas imediações do olho da pluma.

A estrutura de cada pluma, na panela, é função da velocidade de borbulhamento, espessura e propriedades termo físicas da camada de escória, número e localização dos pontos de borbulhamento de gás inerte pelo fundo da panela, nível de aço, entre outros.

Mandal, Satish e Mazumdar⁽⁴⁾ mencionam que o tempo de mistramento do aço, τ_m [s] em panelas operadas com múltiplos pontos de borbulhamento de gás inerte pode ser estimado pela correlação:

$$\tau_m = 8,52 \varepsilon^{-0,33} N^{0,33}$$

Onde, ε [W/kg] e N [---] representam a energia de agitação e o número de pontos de borbulhamento de gás inerte pelo fundo da panela. Patil et al.,⁽⁵⁾ entre outros, reportam que o tempo de mistramento do aço decresce com o aumento da taxa de dissipação de energia e com a presença de uma camada de escória de cobertura (Figura 4).

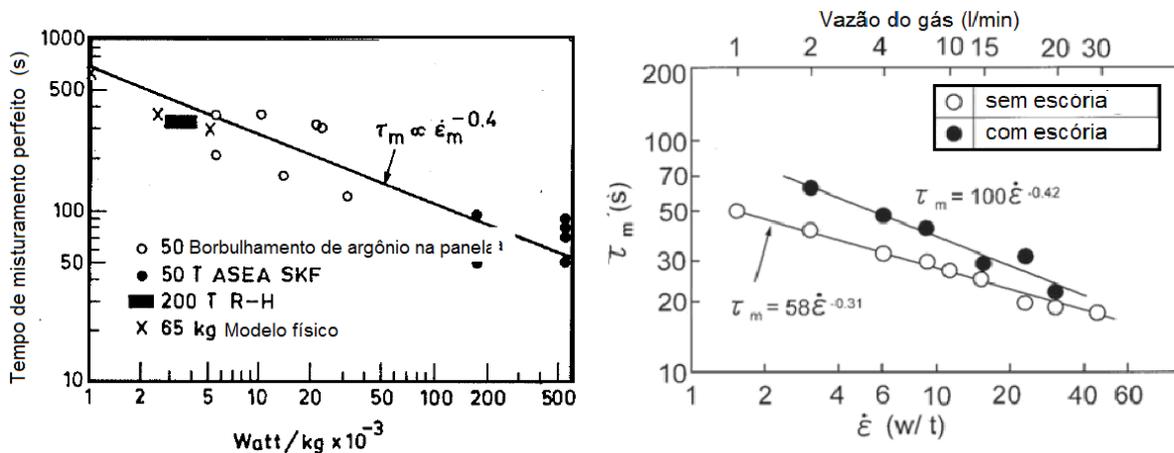


Figura 4 – Influência da taxa de dissipação de energia e presença de escória sobre o tempo de mistramento do aço líquido na panela de refino secundário.⁽⁶⁾

Este trabalho trata da influência de variáveis operacionais como vazão de gás e disposição de injetores sobre o grau de limpidez inclusionária obtida em uma estação de tratamento secundário de aço (Rinsagem) e do modelamento numérico do processo de flotação e separação de inclusões não-metálicas durante o borbulhamento de gás, para o aço SAE9254+Al.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A estratégia utilizada foi modelar o processo de flotação e separação de inclusões não-metálicas durante o processo de injeção de gás inerte, através da avaliação da taxa de dissipação de energia específica ao 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 um procedimento numérico via Computational Fluid Dynamics – CFD, validado pelo modelo físico da panela AMM. 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 físico em acrílico, em escala 1:5 ($\lambda = 0,2$), da panela industrial da ArcelorMittal, usina de Monlevade, cujas especificações são apresentadas na Tabela 1. Este modelo foi utilizado para simulações das condições de trabalho desta usina, além de servir de suporte para validação da simulação computacional.

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

Parâmetro	Valor de Referência	Unidade
Capacidade da Panela	125	t
Altura da Coluna de Aço	3490	mm
Diâmetro da Panela	2600	mm
Vazão de Gás	14 a 70	Nm ³ /h
Nº de Plugues	01	---
Posição do Plugue	780 x 450	mm
Tipo de Plugue	12 aletas de injeção	

Para fins de determinação dos tempos de mistura a montagem experimental compreende a medição contínua de vazões dos gases, condutividade do meio aquoso e transferência, via placa de aquisição de dados A/D, da variação da condutividade com o tempo para um arquivo de computador (Figura 5).

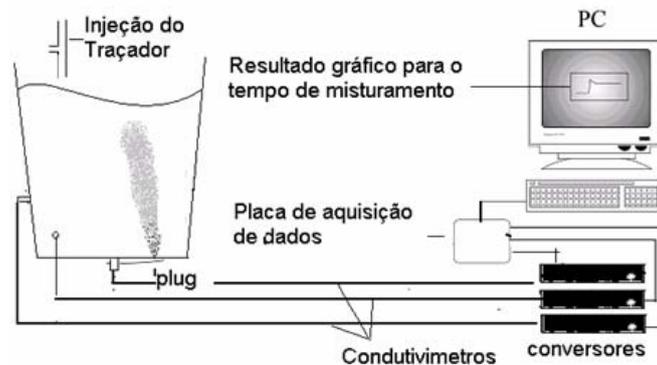


Figura 5– Esquema da montagem experimental no Laboratório de Pirometalurgia do Demet/UFOP.

A determinação do tempo de mistura consiste na análise da dispersão de um traçador (KCl) que é injetado na forma de pulso. A Figura 6 mostra as posições de adição do traçador de KCl, posições dos pontos de borbulhamento de gás inerte e de medidas de condutividade da fase emuladora do aço.

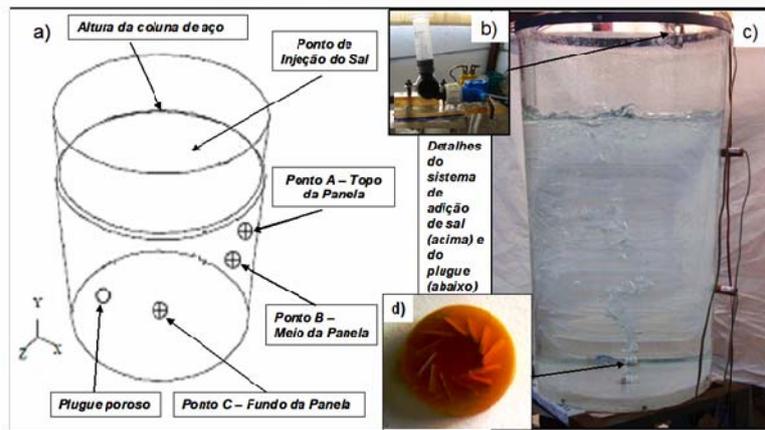


Figura 6 - Esquema da montagem experimental. a) posicionamento dos pontos de aquisição de dados; b) detalhe do sistema de injeção de sal; c) foto da panela em acrílico em escala 1:5 e d) detalhes do plugue de injeção de ar.

A distância dos plugues porosos ao centro da panela (X_1 e X_2) e o ângulo entre eles (θ) são ilustrados na Figura 7. O valor escolhido, $\theta = 135^\circ$, se justifica de acordo com Zhang e Thomas,⁽⁷⁾ que relataram ser a melhor configuração para diminuição de zonas mortas dentro da panela e que concluíram que a distância entre eles e o ângulo entre os dois plugues tinha um efeito importante sobre o fluxo.

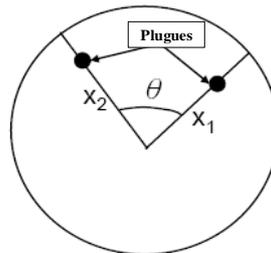


Figura 7 – Posicionamento dos pontos de borbulhamento no fundo da panela de refino do aço.

Respeitada a similaridade geométrica, determinou-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, a expressão:⁽¹⁾

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

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

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



Do modelo matemático foram 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. Este modelo leva em consideração os mecanismos de *Saffman & Turner* e de *Stokes*, de choque 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.⁽⁸⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo matemático do fluxo de líquido na panela utiliza como dado de entrada o diâmetro da bolha e não prevê choque e coalescimento das mesmas. Embora possa haver remoção de inclusões não-metálicas pela captura das mesmas pelas bolhas este mecanismo não foi levado em consideração, como já citado.

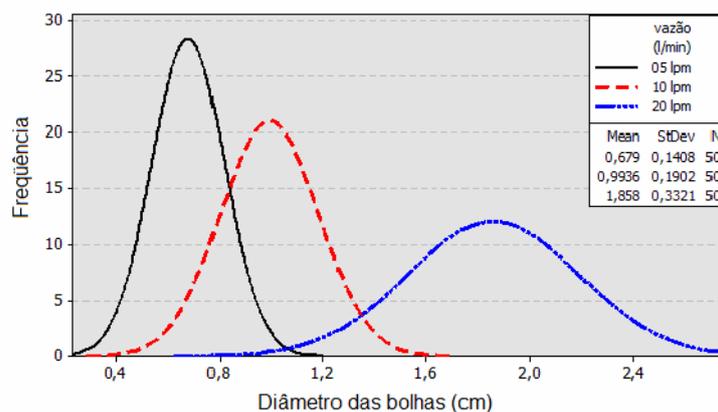


Figura 8 - Histograma para a distribuição do tamanho de bolhas nas filmagens.⁽⁸⁾

Com finalidade exclusiva de determinar o campo de velocidades do fluido, calculou-se o tamanho das bolhas, na região da pluma, através da análise de imagem das mesmas, via o software *Vistamatrix*. O diâmetro de bolha d_B (cm), tal como mostrado no histograma da Figura 8, é a média aritmética das 50 medidas realizadas em cada vazão.

A Figura 9 apresenta a correlação para a velocidade média do fluxo de aço líquido entre os valores medidos via metodologia PIV e os valores calculados na simulação numérica, 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.

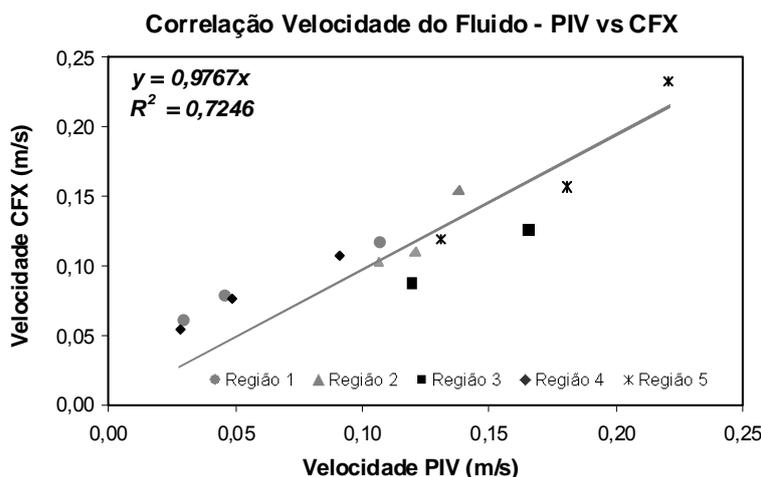


Figura 9 – Correlação entre as velocidades médias nas regiões 1; 2; 3; 4 e 5 para as metodologias PIV vs CFX.⁽⁸⁾

A eficiência da homogeneização do banho, com conseqüente 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, a qual 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 10 evidencia a redução da região “morta”, em frente à pluma e na região inferior do vaso, quando a vazão de gás aumenta.

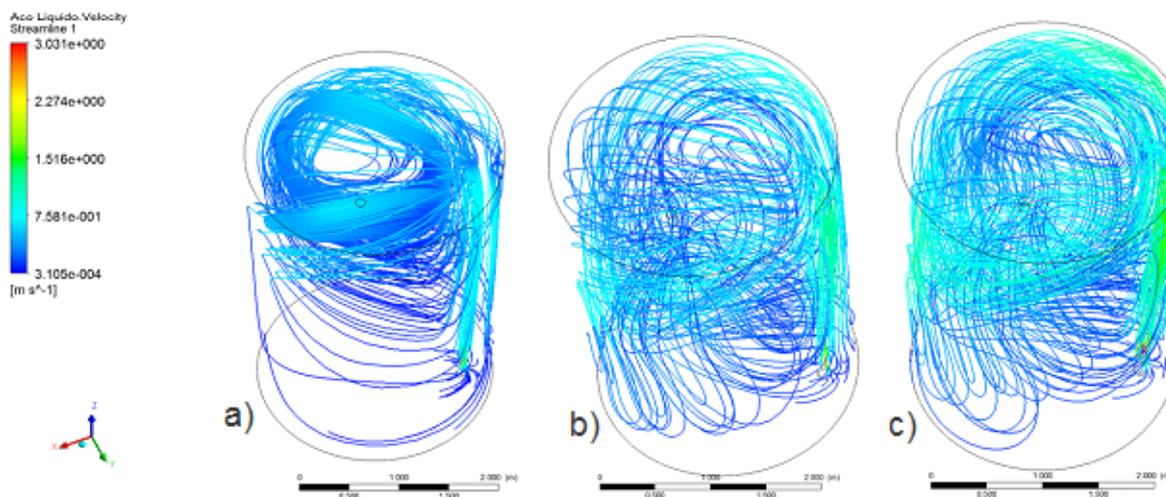


Figura 10 – Distribuição de fluxos responsáveis pela homogeneização do banho no aço líquido na panela de refino. Simulação numérica da condição industrial. Vazões: a) 16,7 Nm³/h; b) 33,5 Nm³/h e c) 67,1 Nm³/h.⁽⁸⁾

As Figuras 11 e 12 mostram que o tempo de misturamento do banho, em panelas 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, mostrou-se menor do que aquela dotada de um plugue (Figura 12).



Correlação Tempo de Mistura (s) e Energia de Entrada (W/kg) – Correlação Tempo de Mistura (seg) e Energia de Entrada (W/kg)

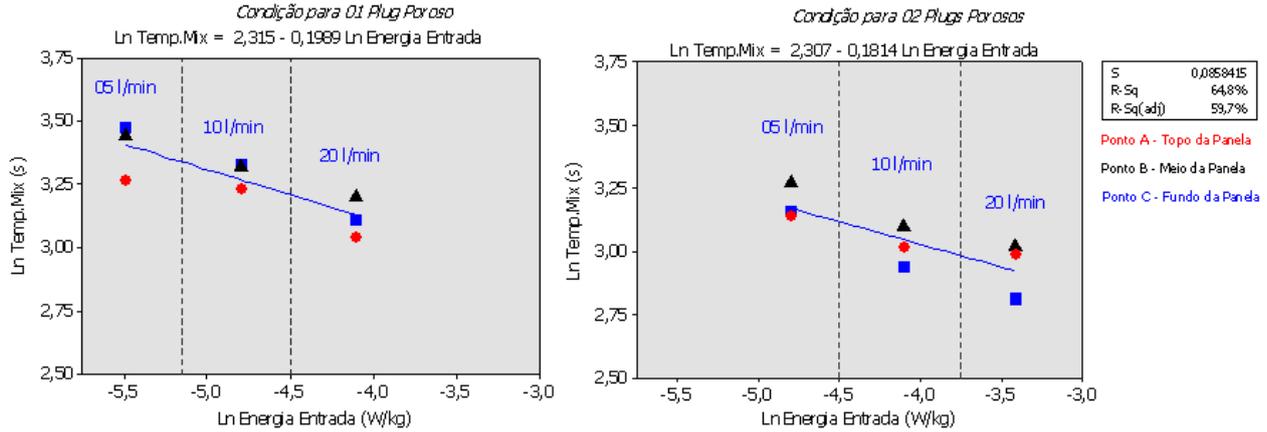


Figura 11 – Influência da taxa de aporte de energia sobre o tempo de misturamento do aço em panela de refino, condições: um e dois plugues porosos.⁽⁸⁾

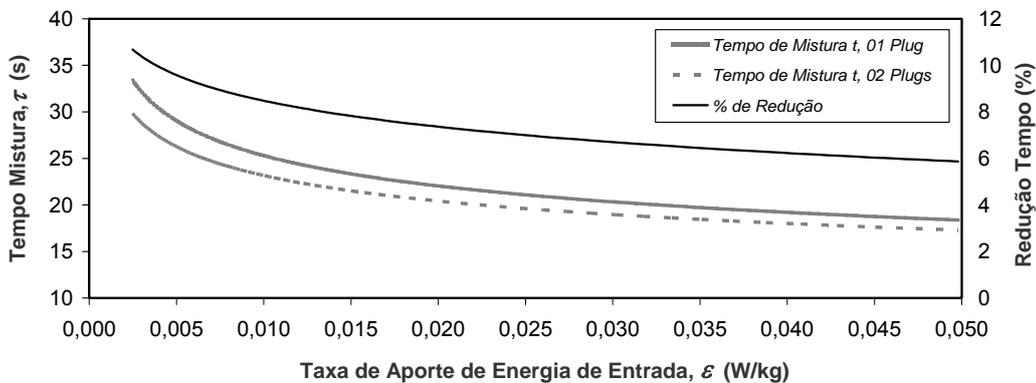


Figura 12 – Efeito da energia de agitação sobre o tempo de misturamento do aço em panela de refino, condições: um e dois pontos de borbulhamento de gás inerte.⁽⁸⁾

Para a configuração de dois plugues porosos localizados 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, mostrou-se superior a de uma panela com um único plugue poroso. Este resultado foi concordante com os trabalhos de Zhang e Thomas.⁽⁷⁾

A Tabela 3 mostra a avaliação da diferença estatística para médias utilizando a metodologia teste-t.

Tabela 3 - Avaliação da diferença estatística para médias utilizando a metodologia teste-t

Modelo em Acrílico para 2 Plugs									
Teste de Diferença Estatística para Médias com $\alpha = 0,05$	Vazão 05 l/min			Vazão 10 l/min			Vazão 20 l/min		
	Média X	Média Y	Diferença	Média X	Média Y	Diferença	Média X	Média Y	Diferença
Ponto A ↔ Ponto B	23,23	26,45	SIM	20,60	21,67	NÃO	19,90	20,66	NÃO
Ponto A ↔ Ponto C	23,23	23,78	NÃO	20,60	18,92	NÃO	19,90	16,63	SIM
Ponto B ↔ Ponto C	26,45	23,78	SIM	21,67	18,92	SIM	20,66	16,63	SIM

Para todos os experimentos conduzidos, ocorreram variações longitudinais do tempo de mistura para as três vazões de borbulhamento de argônio pelo fundo da panela na condição de 02 plugues porosos, como mostra a Tabela 3 e a Figura 13.



Tempo Mistura (seg) vs Condição Vazão; Ponto de Medição

Condição para 02 Plugs Porosos

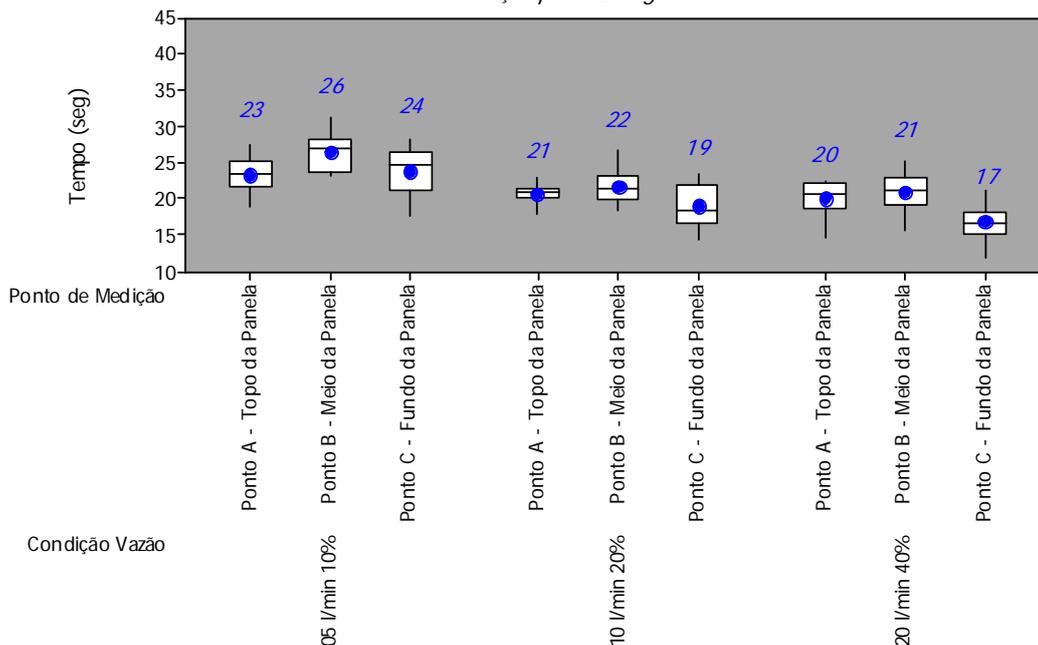


Figura 13 - Variação do tempo de misturamento do aço com a vazão e a distância do fundo da panela dotada de dois plugues porosos.⁽⁸⁾

Um dado relevante no experimento industrial é o valor do Oxigênio Total, o qual representa uma medida indireta da quantidade de inclusões não-metálicas no aço líquido. Neste trabalho, o método utilizado para retirada de amostras para análise da % de oxigênio total foi o amostrador tipo TOS (*Total Oxigen Sampler*) da Heraeus Electro-Nite. Da aplicação desta técnica pôde-se determinar a evolução do Oxigênio Total do aço líquido, durante a operação de Rinsagem, para diferentes vazões de borbulhamento de gás inerte (Figura 14), que também apresenta a previsão do modelo macroscópico de choque, coalescimento e flotação de inclusões não-metálicas. Confrontado com os dados industriais, este modelo apresentou melhor coerência, quando aplicado à condição de vazão de 33,5 Nm³/h.

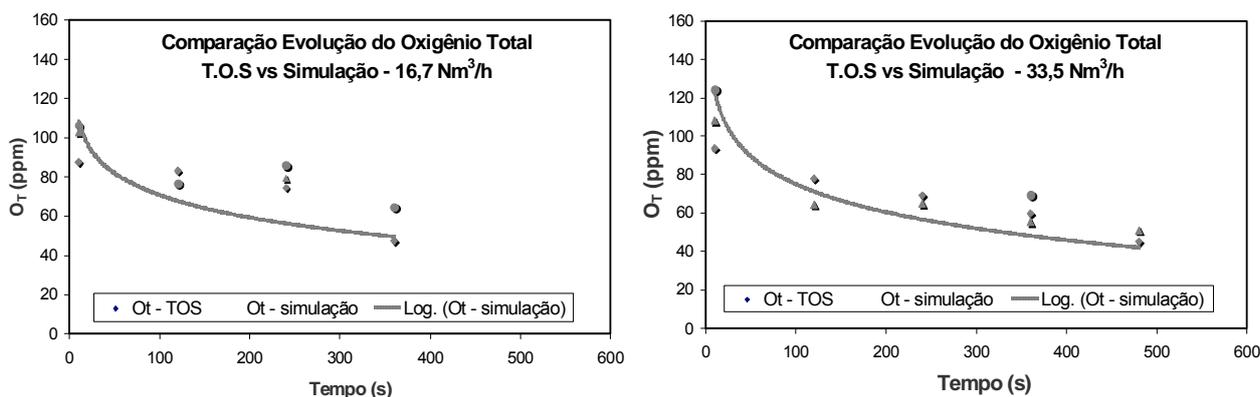


Figura 14 - Previsão do Modelo Macroscópico para Choque e Coalescimento de Inclusões para a evolução das análises de Oxigênio Total. As linhas cheias resultam do modelo macroscópico de choque e coalescimento de inclusões, empregando-se constante de *Saffman & Turner* igual a 1×10^{-4} . Enquanto que os pontos são provenientes dos resultados industriais para as análises de T.O.S.⁽⁸⁾

Para emular matematicamente o processo de remoção inclusões não-metálicas do aço na panela, mostrado na Figura 14, durante o borbulhamento de argônio, considerou-se



os mecanismos de *Saffman & 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] calculada via técnica CFD, apresentada na Figura 15, que é um dos *in puts* para o modelo, junto com o valor para o oxigênio total.

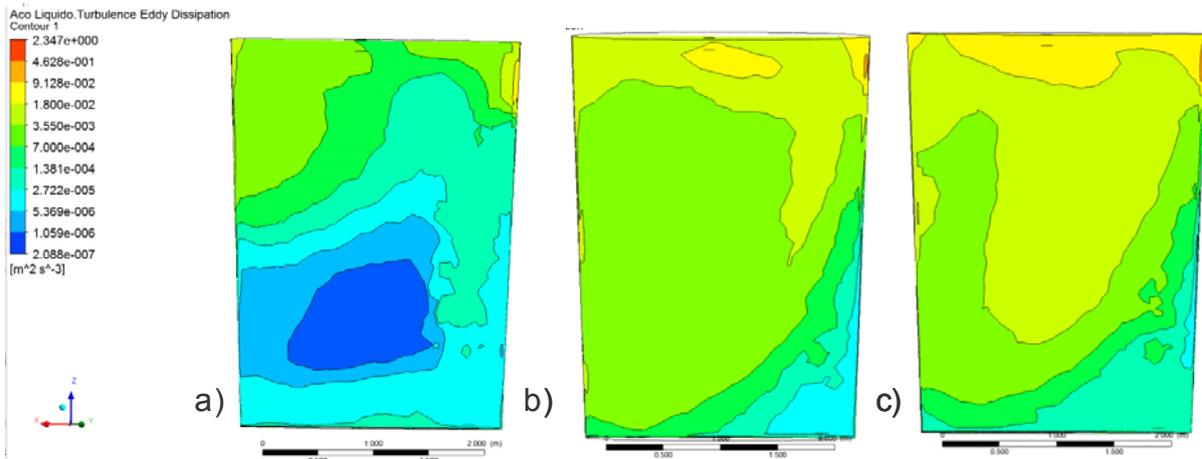


Figura 15 – Perfil para Taxa Específica de Aporte de Energia ao Sistema ϵ [W/kg]. Simulação numérica da condição industrial. Vazões: a) 16,7 Nm³/h; b) 33,5 Nm³/h e c) 67,1 Nm³/h.⁽⁸⁾

A população para análise das inclusões foi composta por amostras de corridas do aço SAE 9254+Al, retiradas ao longo do processo de metalurgia de panela, ou etapa de injeção de gás. Foram retiradas cinco amostras por corrida, totalizando trinta amostras. A distribuição amostral é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Definição da população amostral para análise de inclusões não-metálicas

Vazão (Nm ³ /h)	Nº Amostras / Corrida	Nº Corridas SAE 9254 + Al	Total
16,7	5	3	15
33,5	5	3	15
67,1	5	3	15
Total Geral de Amostras			45

A Figura 16 mostra a evolução do percentual de oxigênio total, medida indireta da quantidade de inclusões não-metálicas, em função da vazão de borbulhamento de gás inerte pelo fundo da panela. Fica evidenciado que o aumento da taxa de borbulhamento de gás inerte incorre em 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 poderá causar a reoxidação e contaminação por outras espécies indesejáveis no aço, durante o período de Rinsagem, motivo pelo qual não foi possível, durante a experimentação industrial, a coleta de amostras na vazão de gás de 67,1 Nm³/h.

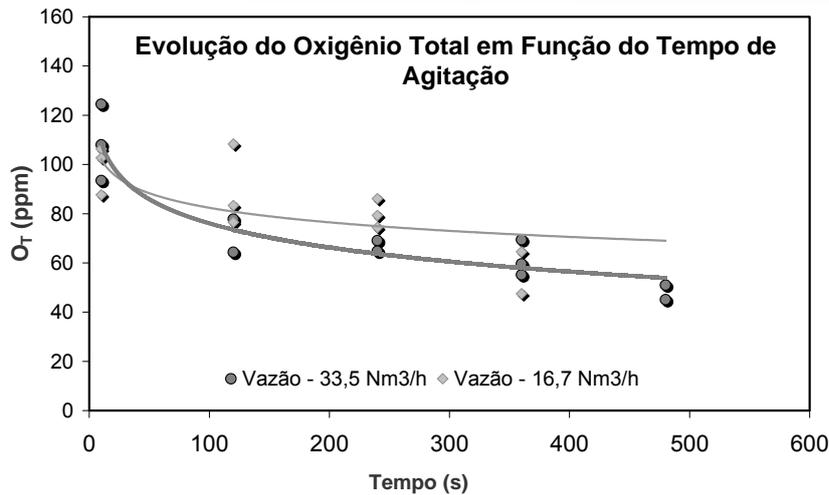


Figura 16 – Variação do oxigênio total com o tempo de borbulhamento de gás inerte para duas vazões diferentes.⁽⁸⁾

O aumento na efetividade de remoção das inclusões não metálicas com o aumento da vazão de gás, também foi confirmada pela avaliação do percentual da área ocupada pelas inclusões nas análises via MEV para as mesmas amostras utilizadas para a avaliação do ppm de Oxigênio Total. A Figura 17 apresenta a evolução da área ocupada pelas inclusões em função do tempo de injeção de gás, para as condições de vazão de 16,7 Nm³/h e 33,5 Nm³/h.

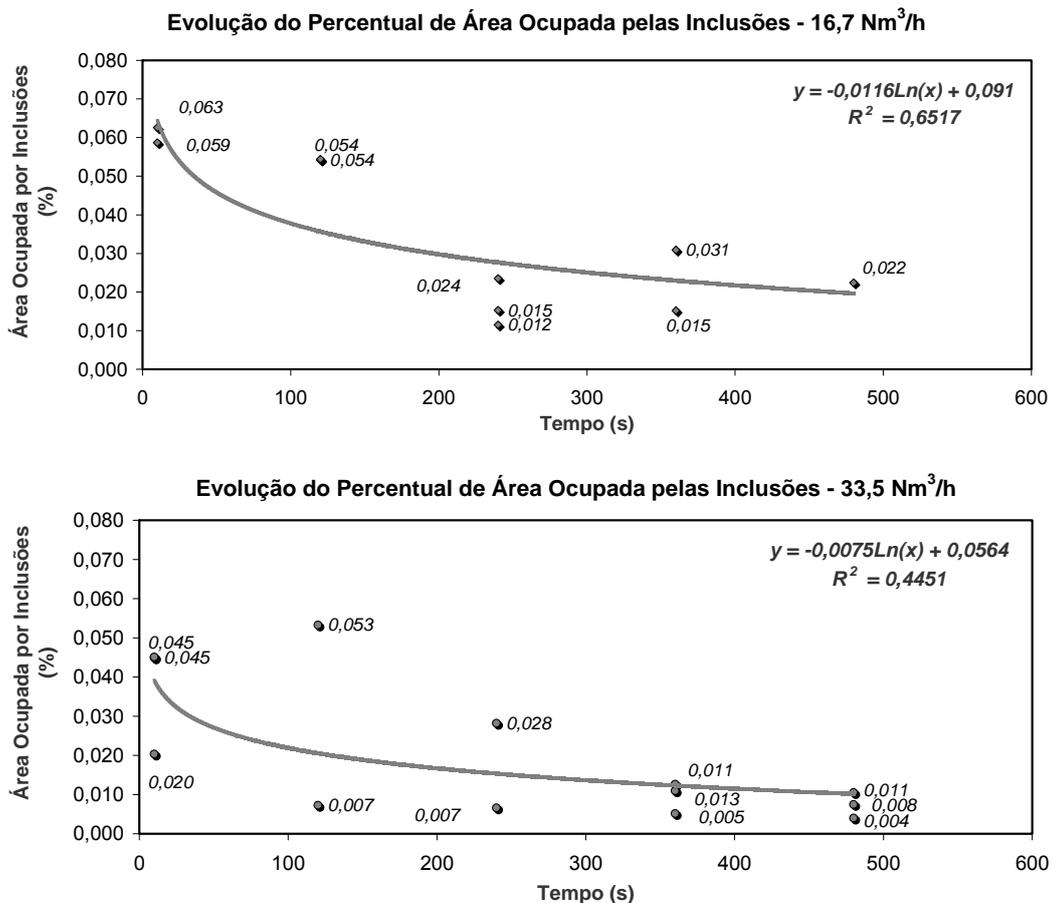


Figura 17 – Evolução da área ocupada pelas inclusões com o tempo de Rinsagem para duas vazões do gás inerte.⁽⁸⁾



4 CONCLUSÕES

Para as condições operacionais investigadas, os seguintes resultados foram obtidos:

- a região de menor intensidade de agitação da panela (zona morta) desenvolveu-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, com o aumento da taxa de borbulhamento de gás inerte de 5l/min para 20l/min resultou 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, foi no topo da panela (interface metal-escória), indicando, na prática industrial, maiores oportunidades de reoxidação do aço;
- para as condições operacionais investigadas, a vazão de 33,5 Nm³/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 mostrou-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 Nm³/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”; e
- a simulação computacional mostrou-se um método confiável (depois de realizada a validação do modelo), seguro e prático para simular este processo industrial.

Agradecimentos

A ArcelorMittal Monlevade e a Redemat/ UFOP pelo apoio irrestrito a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 MAZUMDAR, D.; EVANS, J. W.; **Macroscopic Models for Gas Stirred Ladles**, ISIJ International, Vol. 44, No.3, pp 447 – 461; 2004.
- 2 MAZUMDAR, D & GUTTHRIE, R. I. L – **The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred- Ladle System**. ISIJ Interantional, vol. 35, No. 1, 1995, p. 1;
- 3 MIETZ, J.; SCHNEIDER, S.; AND OETERS, F.; **Model Experiments on Mass Transfer in Ladle Metallurgy**, Steel Research, v. 62, n. 1, p. 1-9,
- 4 M. MADAN, D. SATISH AND D. MAZUMDAR - **Modeling Of Mixing In Ladles Fitted With Dual Plugs** - ISIJ International, Vol. 45 (2005), No. 5, Pp. 677–685
- 5 PATIL et al.; **Mixing Models for Slag Covered, Argon Stirred Ladles**; ISIJ International, Vol. 50 (2010), No. 8, pp. 1117–1124, 2010.
- 6 HAIDA, O; EMI, T; YAMADA, S & SUDO, F - **Scaninject; Part I**, 2nd International Conference on Injection Metallurgy organized by MEFOS and JERKONTORET, June 12-13, 1980, Lulea, Sweden, paper 20.
- 7 ZHANG L., THOMAS B. G.; **Evaluation and Control of Steel Cleanliness - Review**, 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, PA, pp. 431-452. 2002.
- 8 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** - Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, 2011.