

ESTUDO DA REMOÇÃO DE INCLUSÕES POR INJEÇÃO DE GÁS INERTE NA PANELA POR MODELAMENTO FÍSICO*

Pedro Henrique da Rocha Silva¹

Thales Tannous Mourão Cardoso²

Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça³

André Afonso Nascimento⁴

Roberto Parreiras Tavares⁵

Resumo

As inclusões são partículas que, em sua maioria, afetam negativamente as propriedades dos aços. O presente trabalho teve o objetivo de avaliar algumas variáveis no tratamento de borbulhamento de gás para remoção de inclusões na panela durante a sua drenagem na torre de lingotamento. Usou-se um modelo físico em escala 1:5 de uma panela real de aciaria de 180 toneladas de aço. Para contagem das partículas, simulando as inclusões, foi usada a sonda APS. Esta sonda conta as partículas e determina a sua distribuição de tamanhos. Os resultados indicaram que existe um tempo ótimo de tratamento para cada vazão de gás e quanto maior a vazão, menor é esse tempo. Além disso, o trabalho também mostrou que em baixas vazões foram obtidos melhores resultados para o tratamento. Essas conclusões podem ser explicadas pelos fenômenos de reversão e de remoção das inclusões no aço durante o tratamento.

Palavras-chave: Remoção de inclusões; Metalurgia secundária; Aciaria; Modelamento físico.

STUDY OF INCLUSION REMOVAL IN THE LADLE BY INNERT GAS INJECTION BY PHYSICAL MODELING

Abstract

Inclusions are particles that usually have deleterious effects on steel quality. The present work had the objective of evaluating the effects of different variables on the efficiency of the gas bubbling treatment during the drainage of the ladle in the continuous casting process. A physical model in a 1:5 scale of a 180 metric tons ladle was used in the experiments. The APS sensor was used to count and determine the size distribution of the particles used to simulate the inclusions. The results indicated that there is an optimum treatment time for each gas flow rate and that lower gas flow rates gave better results. These conclusions could be explained by the reversion and floatation phenomena.

Keywords: Inclusion removal; Secondary metallurgy; Steelmaking factory; Physical modeling.

¹ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, UFMG - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Simulação de Processos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Estudante de Engenharia Metalúrgica, UFMG - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Simulação de Processos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, CQE/ASQ, Estudante do PPGEM da Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As indústrias siderúrgicas enfrentam continuamente os desafios de redução de custos e melhoria de qualidade de seus produtos. Um dos fatores que costuma afetar negativamente a qualidade dos aços é a presença de inclusões não metálicas. Desta forma, se torna interessante aproveitar ao máximo todas as oportunidades para remoção destas inclusões. Isto inclui o borbulhamento de gás inerte durante a espera e/ou drenagem da panela na torre de lingotamento contínuo.

Tem havido durante as últimas décadas muitos estudos para tratamento das inclusões, como modificar sua morfologia, distribuição de tamanhos e composição química a fim de causarem mínimo efeito prejudicial ao aço.

Este trabalho teve como foco o tratamento de remoção de inclusões através do borbulhamento de gás inerte na panela durante sua espera na torre giratória no lingotamento contínuo. Para tal, foi empregado um modelo físico de uma panela de aciaria construída em escala 1:5 em relação à unidade industrial. Partículas de vidro foram usadas para simular as inclusões. Uma nova metodologia usando a sonda APS foi utilizada para contar as partículas.

2 OBJETIVO

Estudar a eficiência de remoção de inclusões e influência de alguns parâmetros nesta eficiência a partir de estudos realizados em um modelo físico. Os parâmetros investigados foram:

- tempo de espera da panela;
- tempo de injeção de gás;
- vazão de gás.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Propriedades das Inclusões no Aço

As inclusões são deletérias às propriedades do aço, podendo prejudicar a conformabilidade, ductilidade, e resistência à fadiga [1]. Além disso, aumentam o risco de corrosão no produto final, e podem causar entupimento da válvula submersa, fenômeno conhecido como “clogging” [2]. Esse último causa a perda de qualidade dos produtos, além de causar perda de produtividade. Essas inclusões retidas na válvula podem se soltar e ficarem no banho metálico a ser solidificado, causando problemas posteriores ao aço. A mudança de fluxo e a mudança de vazão de aço para o molde devido ao “clogging” podem gerar problemas durante a operação como reoxidação do aço e captação de inclusões de pó fluxante. Outro problema é o mau funcionamento da válvula tampão, comprometendo assim a estabilidade operacional do processo.

Além disso, já é de amplo conhecimento a forma que as inclusões adquirem após serem laminadas. Essa forma pode gerar tensões internas que podem causar a ruptura prematura do aço.

3.2 Mecanismos de Remoção de Inclusões

As inclusões podem ser removidas do aço através dos seguintes mecanismos:

- Remoção para a escória: devido à grande diferença de densidade entre as inclusões e o aço, elas tendem a subir para a escória. A velocidade de subida das inclusões pode ser calculada pela lei de Stokes. Quanto maior e menos densa a inclusão, mais rápido ela subirá [1];
- Remoção para o revestimento refratário: já é de conhecimento o acúmulo de inclusões, principalmente de alumina nos revestimentos refratários e também nas paredes de válvulas [1];
- Remoção por flotação através de bolhas: acontece devido à adesão das partículas de inclusões às bolhas. Por diferença de densidade, a bolha sobe até a escória e remove a inclusão do banho metálico. São vários os modelos estudados por diversos pesquisadores, mas destacam-se os modelos de bolha com formato de calota esférica, pois quando as bolhas aumentam seu tamanho, a forma esférica fica muito instável e por isso o modelo de calota esférica se torna mais representativo [1]. A probabilidade de colisão aumenta com a diminuição do tamanho das bolhas e com o aumento do tamanho da inclusão. A probabilidade de adesão aumenta com a diminuição do tamanho das inclusões [2]. Já que a probabilidade de colisão é muito menor que a probabilidade de adesão, o mecanismo mais limitante será o de colisão, ou seja, quanto menores as bolhas, maior será a chance de remoção da inclusão;
- Remoção por fluxo ascendente das bolhas: quando a bolha sobe através do aço líquido, ela cria um fluxo ascendente e mesmo que a inclusão não esteja aderida à bolha, ela seguirá o fluxo ascendente até certa altura, podendo ser removida para a escória ou não, isso dependerá de qual posição ela estará dentro do reator. Quanto mais a inclusão estiver na parte superior do reator, maiores serão as chances de ser removida. Esse fluxo é criado perto da bolha, e toda partícula que estiver perto será influenciada por ele. O quão próximo da bolha a partícula terá de estar para ser influenciada por esse fluxo dependerá do tamanho da bolha. Quanto maior a bolha, maior será o raio de alcance do fluxo. Sendo assim, esse mecanismo tem maior eficiência quanto maior for o tamanho da bolha [3].

3.3 Modelamento Físico

O modelamento físico é muito importante para pesquisas e estudos dos comportamentos dos equipamentos e sistemas em escala industrial. Também são muito importantes para prever o comportamento de novos sistemas antes de serem levados até o sistema industrial. Os modelos físicos são construídos em escala ou em tamanho real, dependendo das possibilidades do laboratório. Para a operação adequada dos modelos físicos e para que seus resultados possam ser transpostos para a escala industrial, as condições experimentais devem respeitar critérios de similaridade especificados em termos de números adimensionais. Em processos com injeção de gases em metais, normalmente se usam os números adimensionais de Froude e Froude modificado [4].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos experimentos realizados, foi utilizado um modelo físico em escala 1:5 em relação a uma panela industrial de 180 toneladas de capacidade de aço líquido. A água foi usada para simular o aço e partículas de boro-silicato foram usadas para simular as inclusões. Para seleção das condições de ensaio no modelo físico, foi utilizado o critério de similaridade baseado no número de Froude modificado e os

tamanhos das partículas foram selecionados de acordo com o critério proposto por Sahai e Emi [5]. As partículas detectadas pela APS variam entre 20 μ m e 170 μ m de diâmetro, correspondendo a inclusões de 32 μ m até 272 μ m no aço.

As dimensões do modelo são 73cm de altura, 66cm de diâmetro no fundo e 76cm de diâmetro no topo. As posições do dreno e do ponto de injeção de gás estão indicados na figura 1.

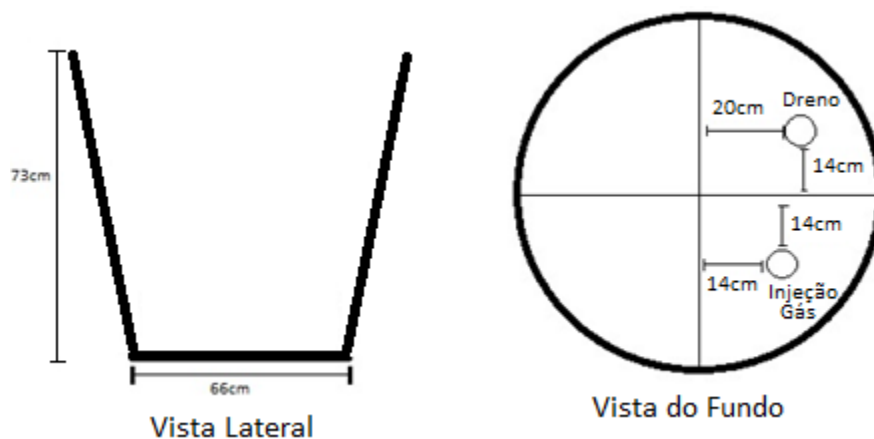


Figura 1 – Dimensões do modelo físico e localizações do dreno e ponto de injeção de gás

O modelo físico utilizado pode ser observado na figura 2, que mostra as visões superior e lateral da panela.



Figura 2 – Visão superior e lateral do modelo físico da panela de aciaria.

A numeração na figura 2 corresponde a: 1 – plugue poroso para injeção de ar, 2 – sonda APS situada sobre o dreno da panela, 3 – tubo para injeção de partículas e 4 – placa de cobre para redução de ruído no sinal da sonda.

A contagem de inclusões foi feita através da sonda APS, situada sobre o dreno da panela a aproximadamente 2 cm de altura do fundo. A sonda conta as partículas através da diferença de potencial gerada pela partícula ao passar por um orifício calibrado. A contagem das partículas foi feita após o tratamento de borbulhamento durante a drenagem da panela. Essa metodologia foi desenvolvida pelo LaSiP e não foi encontrado outro trabalho com contagem de inclusão durante a drenagem da panela.

Foi acoplado à panela um tubo plástico fino, por onde as partículas foram injetadas através de uma seringa diretamente no fundo e no centro da panela. A homogeneização das partículas foi feita através de um motor com hélices acopladas. A vazão do gás foi realizada por um medidor de vazão Dwyer, modelo GFM-1145. As condições adotadas nos ensaios estão apresentadas na tabela 1. Todos os testes foram realizados em duplicata.

Tabela 1 - Testes realizados no modelo físico da panela

Teste	Tempo de Espera (s)	Tempo de Borbulhamento (s)	Vazão de Gás (NI/min)
1	420	0	0
2	420	80	5
3	420	107	5
4	420	134	5
5	420	80	6
6	420	107	6
7	420	134	6
8	420	80	8
9	420	107	8
10	420	134	8
11	420	80	9
12	420	107	9
13	420	134	9
Sobre-testes			
14	420	402	5
15	840	0	0
16	420	27	18

Os tempos e vazões representados na tabela 1 estão convertidos para modelo em escala, de acordo com as equações 1, 2, 3 e 4 propostas por D. Mazumbar e J. W. Evans [4] mostradas a seguir:

$$Q_{\text{mod}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = Q_{\text{ind}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * \gamma^{2,5} \quad (1)$$

$$Q_{\text{ind}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = Q_{\text{ind}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right) * \frac{1873}{273} * \frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_{\text{aço}} * g * H_{\text{ind}}}{2 * 101330}\right)} \quad (2)$$

$$Q_{\text{mod}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = Q_{\text{mod}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right) * \frac{298}{273} * \frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_{\text{água}} * g * H_{\text{mod}}}{2 * 101330}\right)} \quad (3)$$

$$t_{\text{mod}} = t_{\text{ind}} \sqrt{\gamma} \quad (4)$$

Onde Q_{mod} é a vazão de gás no modelo, Q_{ind} é a vazão na indústria, γ é o fator de escala, $\rho_{\text{aço}}$ é a densidade do aço, $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, H_{ind} é a altura de aço na panela na indústria, H_{mod} é a altura de água na panela no modelo, t_{mod} é o tempo para os tratamentos no modelo e t_{ind} é o tempo de tratamento na indústria.

Estes tempos e vazões são correspondentes aos tratamentos que podem ser aplicados na panela para remoção de inclusões na torre giratória. Os tempos e vazões calculados correspondentes na indústria estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Tempos e vazões correspondes aos testes na indústria

Tempo Modelo (s)	Tempo Indústria (s)	Vazão Modelo (NI/min)	Vazão Indústria (Nm ³ /h)
27	60	5,0	5,4
80	180	6,0	6,5
107	240	8,0	8,6
134	300	9,0	9,7
402	900	18,0	19,4

4.1 Avaliação dos Resultados

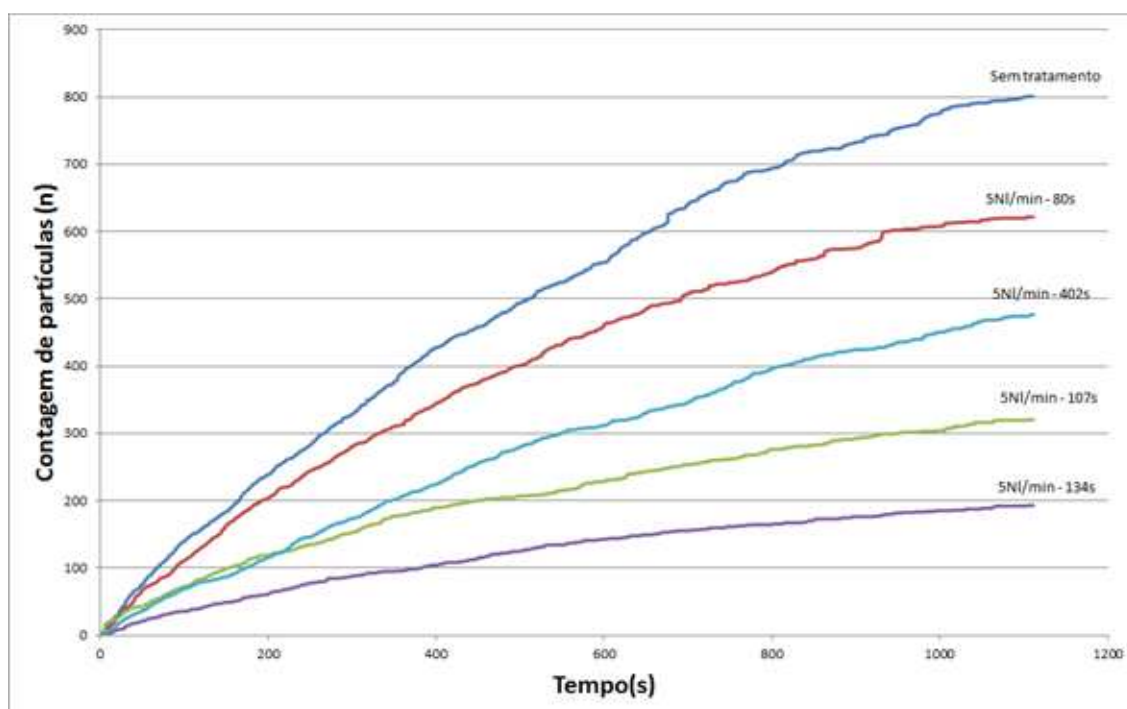
Quanto mais eficiente for o tratamento, mais partículas serão flotadas e ficarão na parte superior da panela, seja flutuando na superfície da água ou pouco abaixo da superfície.

A sonda APS está próxima do fundo da panela e determina o número de partículas que passa para o distribuidor. Desta forma, o tratamento mais eficiente será aquele que apresentar a menor contagem de partículas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram curvas de contagem acumulada de partículas para cada teste realizado. Novas curvas foram feitas com as médias dos valores dos dois testes em cada condição experimental.

Além disso, a vazão de água na saída do dreno da panela varia com o passar do tempo, o que afeta a vazão de sucção da sonda, tornando assim a contagem menor no final. Para uma melhor análise dos resultados foi feita uma ponderação dos dados obtidos considerando a variação da vazão. Assim foi possível obter gráficos como o da figura 3, que representa os resultados para o tratamento com vazão de 5NI/min.

**Figura 3** - Gráfico da contagem ponderada de partículas para vazão de 5NI/min

Como pode ser observado para o tratamento com a vazão de 5NI/min, quanto maior o tempo de tratamento, menor será a contagem de partículas. Como se tem aproximadamente 2cm de coluna d'água que não passa pela sonda e ao considerar a mesma quantidade de partículas injetada em todos os ensaios, pode-se afirmar que a contagem é menor devido à maior taxa de remoção de partículas para a camada superior de água, que não é contada pela sonda. Contudo, deve haver um tempo máximo no qual é obtida a maior taxa de remoção de partículas, pois no tratamento com maior tempo (representado pelo tratamento de 402s), a eficiência de remoção de partículas diminuiu. A figura 4 mostra o gráfico para o tratamento com vazão de 9NI/min.

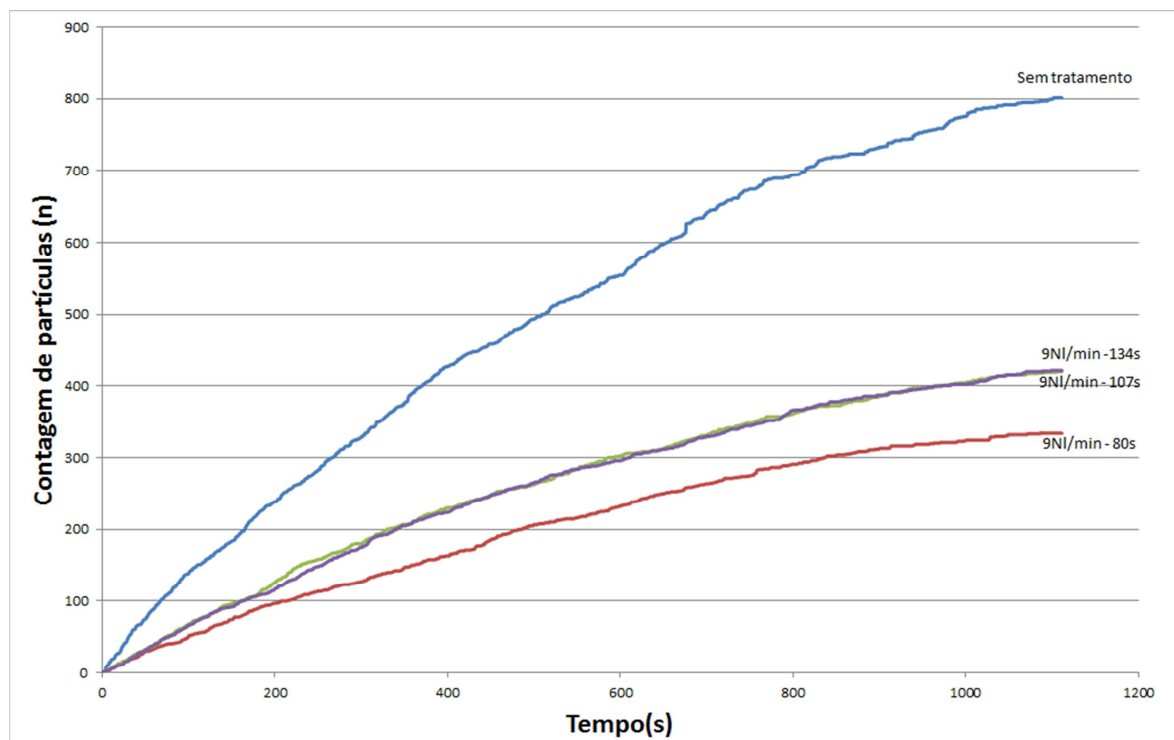


Figura 4 - Gráfico de contagem ponderada de partículas para a vazão de 9NI/min

Para vazões maiores, pode-se observar que, quanto menor o tempo de tratamento, maior será a eficiência de remoção. Isso se deve ao fato da alta turbulência fazer com que haja mais reversão de partículas do que remoção. Isso também acontece para os tratamentos com vazão de 8NI/min. Talvez tempos menores tragam resultados mais eficientes do que os resultados nos tempos usados para essas vazões, contudo ainda existem espaços para a investigação dessa premissa. A figura 5 mostra os testes feitos para 80s de tratamento de borbulhamento, para as diferentes vazões adotadas.

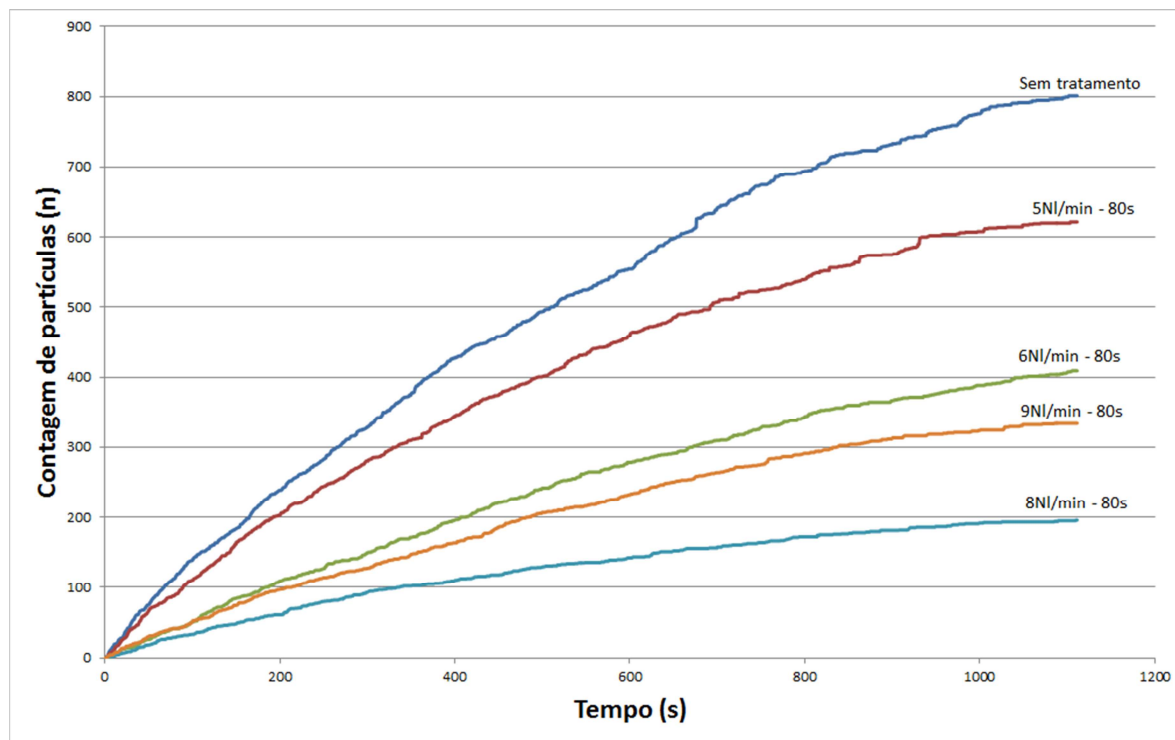


Figura 5 - Gráfico de contagem ponderada de partículas para tratamentos de 80s

A figura 6 mostra os testes feitos para 134s de tratamento de borbulhamento.

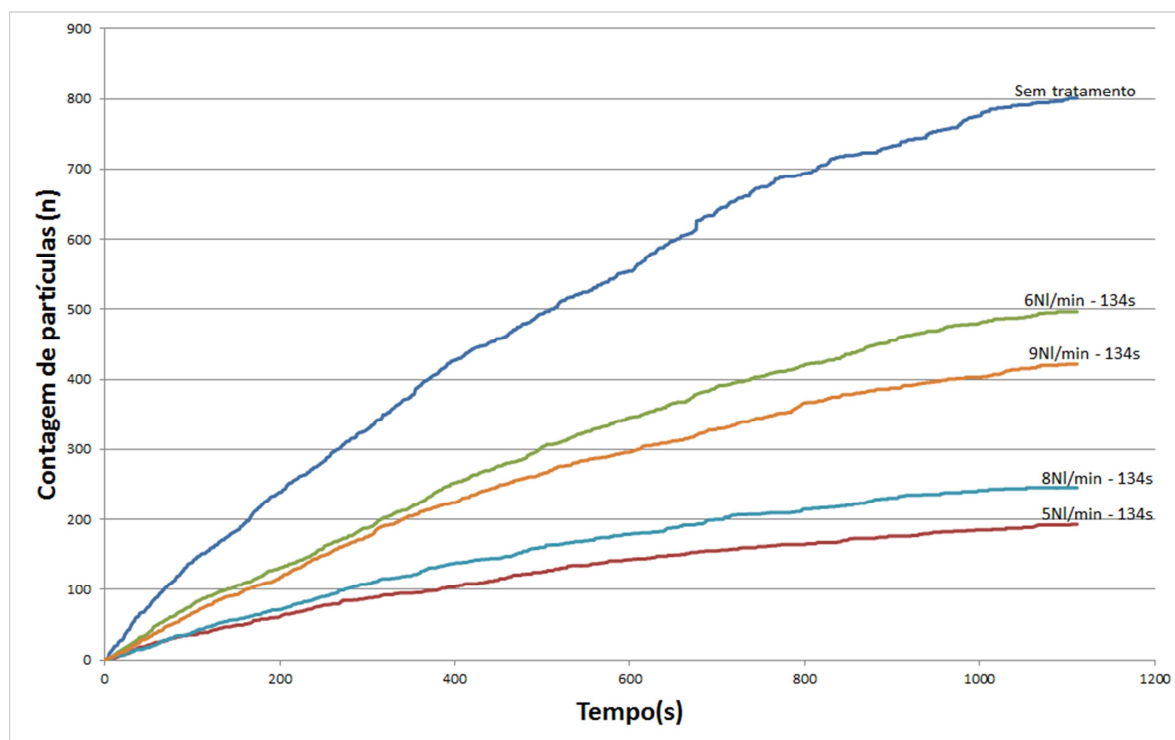


Figura 6 - Gráfico de contagem ponderada de partículas para tratamentos de 134s

Da mesma forma que acontece para o tratamento de 5NI/min, o tratamento de 6NI/min apresenta um tempo em que se tem a maior eficiência de remoção de partículas. Após esse tempo, o tratamento passa a reverter mais partículas do que remover. Pode-se observar que esse tempo para máxima eficiência está entre 80s e 134s, já que a curva de 134s apresenta uma maior contagem.

O tratamento de 8NI/min é o que remove maior quantidade de partículas num menor tempo, assim sua maior eficiência é dada no tempo de 80s. A partir deste momento esta reduz. Talvez em um menor tempo de tratamento, a eficiência de remoção de partículas seja ainda maior, contudo, novamente, ainda há espaços para investigações futuras.

O tratamento de 9NI/min não apresenta boa eficiência de remoção de partículas, uma vez que seus resultados são piores que o tratamento de 8NI/min e vão piorando com o tempo. Acredita-se que em um tempo menor sua eficiência seja maior.

De uma forma geral, observa-se que existem tempos máximos para os tratamentos em cada vazão. Esses tempos representam a maior eficiência para remoção de partículas nesta determinada vazão. Esse tempo decresce com o aumento da vazão. Um resultado semelhante aos apresentados por *Lou, W. e Zhu, M.* [6], que fizeram um trabalho de simulação matemática para descrever o comportamento das inclusões. Para os autores, quanto maior a vazão, maior será a taxa de remoção de inclusões, porém para cada vazão, há um tempo ótimo de tratamento, sendo esse tempo menor para vazões maiores. Como o presente trabalho não abordou tempos menores que 80s e entendendo-se que nesses tempos, os resultados para altas vazões são melhores, pode-se dizer que os resultados são semelhantes.

Em relação à comparação entre tempos de espera, como foi feito no teste 15 da tabela 1, os resultados mostraram que um maior tempo de espera leva a uma maior eficiência de remoção. Enquanto um tempo de 420s de espera levou a 800 partículas na média, o tempo de 840s de espera levou à contagem de 637 partículas na média. Uma eficiência muito baixa se comparada com os tratamentos de borbulhamento.

Em relação ao teste de altíssima vazão, teste 16 da tabela 1, o tratamento a 18NI/min mostrou-se muito pouco eficaz, pois apresentou uma contagem de 822 partículas contra 800 partículas para condição de não haver tratamento.

Outra observação importante que pode ser levada para estudos posteriores é que a máxima eficiência depende do tempo e da vazão de borbulhamento. Isso mostra que ao determinar-se o tempo gasto no tratamento, ou seja, o tempo de espera da panela na torre giratória ou até mesmo após o último refino secundário, pode-se determinar a vazão de tratamento onde se obtenha melhores resultados. Mais estudos são necessários para achar uma boa correlação entre essas três variáveis e se determinar uma equação na qual possam ser feitos os cálculos de vazão mais conveniente.

6 CONCLUSÃO

As conclusões que podem ser tiradas do trabalho são:

- Existe um tempo ótimo para borbulhamento de gás em cada vazão para que se obtenha máxima eficiência;
- Esse tempo ótimo é maior para os tratamentos em baixas vazões e menor para os tratamentos em altas vazões;
- Provavelmente o tempo ótimo existe devido à reversão de partículas para o banho metálico. Acredita-se que no início do tratamento, por haver um grande número de partículas no banho, os tratamentos removem mais partículas do que reverterem, porém, com o passar do tempo e com a diminuição de partículas no banho, a reversão passa a ser maior que a remoção;
- Devido à alta turbulência dos processos em altíssima vazão, mesmo que removam muitas partículas, vão revertê-las mais ainda tornando seu uso não

recomendável. Esse tipo de tratamento é pior do que se não houvesse tratamento algum;

- O tempo de espera promove a remoção de partículas, porém essa redução é muito baixa se comparada com os tratamentos de borbulhamento;
- Como a maior eficiência do processo depende do tempo e da vazão conhecendo-se o tempo disponível para tratamento, o que é bastante plausível numa aciaria moderna, pode-se saber qual vazão de gás usar para se obter uma máxima eficiência de remoção de inclusões.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido ao projeto Processo PPM-00118-13 Título: "Modelagens física e matemática do escoamento multifásico em reatores metalúrgicos".

Os autores agradecem aos colegas do curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, em especial aos que trabalharam no Laboratório de Simulação de Processos e ajudaram muito no projeto, ao técnico Paulo Pádua pela colaboração no desenvolvimento do projeto e aos colegas da Usiminas pela ajuda e confiança no trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 M. Söder – Growth and Removal of Inclusions During Ladle Stirring, Licentiate Thesis, Department of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.
- 2 M. A. Van Ende – Formation and Morphology of non-Metallic Inclusions in Aluminium Killed Steel, Tese de Doutorado, Université Catholique de Louvain, Bélgica, janeiro de 2010.
- 3 H. L. Yang; P. He; Y. C. Zhai – Removal Behavior of Inclusions in Molten Steel by Bubble Wake Flow Based on Water Model Experiment, ISIJ International, Vol. 54 (2014), No. 3, p. 578 – 581.
- 4 D. Mazumbar; J. W. Evans – Modeling of Steelmaking Processes, Boca Raton, CRC Press, 2010.
- 5 Y. Sahaia; T. Emi – Criteria for Water Modeling of Melt Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundishes, ISIJ International, Vol 36 (1996), No. 4, p. 1166 – 1173
- 6 W. Lou; M. Zhou – Numerical Simulations of Inclusion Behavior in Gas-Stirred Ladle, Metallurgical and Materials Transactions B, vol 44B, 2013