

# ESTUDO COMPARATIVO DA REMOÇÃO DE INCLUSÕES DO AÇO LÍQUIDO NOS PROCESSOS RH E ESTAÇÃO DE BORBULHAMENTO\*

*Marina Braga Campos<sup>1</sup>  
Johnne Jesus Mol Peixoto<sup>2</sup>  
Carlos Antônio da Silva<sup>2</sup>  
Itavahn Alves da Silva<sup>2</sup>*

## Resumo

A composição, morfologia e distribuição de tamanho das inclusões presentes nos aços têm forte influência sobre propriedades químicas e físicas como fadiga, usinabilidade e resistência à corrosão. Desta forma, melhorar a qualidade do aço implica em aumentar a limpidez do aço líquido [1]. Para tanto são utilizados processos (que apresentam diferentes custos operacionais) como o borbulhamento de gás inerte na panela e o tratamento no desgaseificador a vácuo RH. O presente trabalho apresenta resultados de simulações matemáticas bem como operacionais dos processos de remoção de inclusões através do borbulhamento de gás inerte e do tratamento a vácuo. É feita uma comparação entre as capacidades de remoção de inclusões destes processos, confirmando a maior efetividade do reator RH.

**Palavras-chave:** Inclusões; RH; Borbulhamento.

## COMPARATIVE STUDY OF THE INCLUSIONS REMOVAL FROM LIQUID STEEL IN THE PROCESSES OF RH AND BUBBLING STATION

### Abstract

Inclusions size distribution, morphology and composition play a remarkable role on steel quality because they strongly influence the chemical and physical properties of the steel such as fatigue, machinability and corrosion resistance. Therefore, in order to improve the quality of the steel, it is necessary to increase the cleanliness of the liquid steel [1]. For that purpose, processes (with different operating costs) are used, such as the bubbling of inert gas in the ladle and its treatment in the RH vacuum degasser. This work presents results from mathematical simulations as well as from industrial trials regarding of removal of inclusions through a rinsing station and RH degasser. A comparison is made confirming the RH superiority.

**Keywords:** Inclusions; RH; Bubbling Station.

<sup>1</sup> Engenheira Metalurgista, Especialista em Aciaria na Gerdau Ouro Branco.

<sup>2</sup> Prof. PhD/DSc, Engenheiro Metalurgista, DEMET/UFOP/REDEMAT; Ouro Preto, Minas Gerais

## 1 INTRODUÇÃO

A composição, quantidade e distribuição de tamanhos de inclusões não metálicas influenciam fortemente as propriedades químicas e físicas do aço como fadiga, usinabilidade e resistência à corrosão. Portanto melhorar a qualidade do aço implica em aumentar a limpidez do aço líquido, ou seja, reduzir o número e tamanho das inclusões no aço líquido. [1]

A injeção de gás é comumente praticada nos processos de metalurgia secundária de ferrosos e não ferrosos e esta técnica é utilizada para atingir homogeneidade de temperatura e composição química do metal e para auxiliar na remoção de uma segunda fase e de impurezas dissolvidas nos metais líquidos. [2]

Além do processo de rinsagem, tem crescido a atenção dada ao processo de RH (que é geralmente utilizado para desidrogenação (de-H), desnitrogenação (de-N) e descarburização (de-C)) devido à sua forte habilidade de remover inclusões. [3]

### 1.1. Remoção de inclusões através do borbulhamento de gás inerte

O desenvolvimento dos processos de rinsagem tem focado em duas condições principais: obtenção de bolhas pequenas e boa mistura. Bolhas pequenas implicam em uma grande área de interface gás-líquido, resultando numa alta probabilidade de aderência das inclusões às bolhas e uma boa mistura aumenta a eficiência de transferência de massa. [4]

Simulações em modelos a frio mostram que quando as partículas não têm boa molhabilidade pela fase líquida (caso da alumina e da sílica), as mesmas podem ser capturadas por bolhas de gás e flotar até a superfície livre [2].

Zhang & Taniguchi [4] fizeram uma revisão dos fundamentos da remoção de inclusões por flotação com bolhas de gás inerte, ressaltando que o mecanismo de interação entre a bolha e a inclusão segue as etapas indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a saber: 1 - Aproximação da bolha e da inclusão; 2 - Formação de um fino filme líquido entre a bolha e a inclusão; 3- Oscilação ou deslizamento da inclusão na superfície da bolha; 4- Drenagem e ruptura do filme com a formação de um contato trifásico dinâmico; 5- Estabilização do agregado bolha-inclusão; 6- Flotação do agregado bolha-inclusão. De acordo com os mesmos os passos 2 e 4 possuem um papel central neste processo.

Söder *et al* [5] utilizaram um modelo estático para estudar o crescimento e remoção de inclusões durante a rinsagem em uma panela de aço com o objetivo de descobrir se a flotação com bolhas de gás inerte tem algum efeito significativo na remoção de inclusões em comparação com a adesão à escória e refratário. Neste modelo admitiram que as bolhas têm formato de calotas esféricas.

Em relação ao crescimento das inclusões, concluíram que a colisão turbulenta aparece como o fenômeno mais importante para panelas de aço borbulhadas com gás inerte. A quantidade de colisões turbulentas aumenta com o aumento da diferença de tamanho das inclusões e a quantidade de colisões de Stokes somente é maior do que o turbulento quando a diferença de tamanho entre as duas inclusões é grande, como se pode observar na Figura .

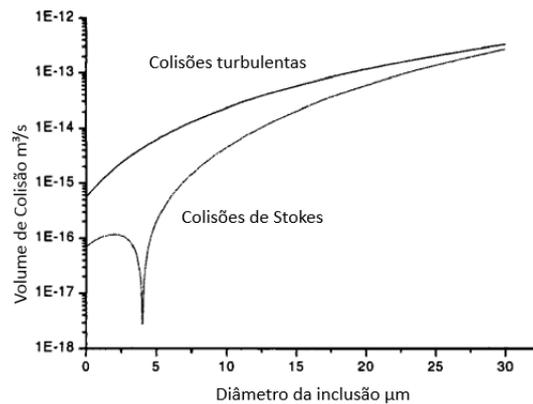


Figura 1 - Volumes de colisão turbulenta e de Stokes para inclusões de 4µm de diâmetro em função do tamanho das outras inclusões [5]

As velocidades e taxas de dissipação de energia variam na panela, resultando em variações de volumes de colisão em diferentes regiões da mesma. O volume de colisão nas zonas laminares é cerca de 1% do volume de colisão nas zonas turbulentas, portanto, pode-se afirmar que para colisões de inclusões de todos os tamanhos possíveis, a colisão laminar é provavelmente desprezível em comparação com a colisão turbulenta em panelas com rinsagem de gás inerte [5].

Marins [6], ressaltou que existe a possibilidade de contaminação do aço durante a rinsagem devido à interação do aço com a escória e com o ar atmosférico (possível reoxidação do aço e contaminação com nitrogênio e hidrogênio). De acordo com o mesmo esta contaminação depende da “geometria, número e arranjo dos pontos de borbulhamento do gás inerte, além da vazão de gás inerte, nível de aço e volume e composição da escória de cobertura (...), por isso, é importante o controle da vazão de gás para inibir a ocorrência da emulsão metal-escória”.

## 1.2. A remoção de inclusões no processo de desgaseificação à vácuo RH

Shirabe e Szekely [7] realizaram simulação computacional do fluxo de aço na panela utilizando as equações de Navier-Stokes e o modelo k-ε para calcular o fluxo turbulento e observaram que há dois vórtices principais, um na região abaixo da perna de descida e outro de recirculação, de maior magnitude, entre a perna de subida e de descida. O fluxo é altamente turbulento, principalmente na saída da perna de descida, o que mostra que o RH é, de fato, um excelente misturador. Miki *et al.* [8] desenvolveram um modelo matemático governado pelo princípio da conservação da massa para prever a mudança de tamanho e distribuição das inclusões durante o tratamento do aço no RH. Para isso, calculou-se separadamente a coagulação de inclusões, a remoção pela flotação, o padrão de fluxo do fluido e a captura de inclusões pelas bolhas de argônio. Afirmaram que as inclusões se aderem às bolhas de argônio acima da perna de subida e a flotação devida à adesão às bolhas é capaz de reduzir principalmente o número de inclusões grandes. Além disso, afirmaram que um minuto após a adição de alumínio é possível encontrar grandes inclusões dendríticas, porém, após quinze minutos estas inclusões desaparecem e encontra-se grandes agregados. Concluiu-se que as inclusões grandes são capazes de flotar, enquanto as pequenas coalescem. Estes agregados formados pelas inclusões menores possuem maior dificuldade para flotar pois, como o aço preenche os espaços vazios entre as partículas, a sua densidade resultante é próxima à densidade do aço.

Concluíram que o RH é capaz de reduzir o teor de alumina do aço líquido de mais de 150ppm para menos de 50ppm e que o aumento da taxa de dissipação de energia (que pode ser obtido através do aumento da vazão de argônio) é eficiente para a desoxidação, pois o número de inclusões menores que 5 $\mu$ m de raio é controlado pelas colisões e a maior parte do oxigênio provém das inclusões pequenas.

Yang *et al* [9] realizaram um experimento industrial envolvendo duas corridas de um aço API-X70 na aciaria da NISCO, na China, seguindo a rota de produção: dessulfuração por injeção de material em pó, convertedor LD, forno-panela, desgaseificador RH (com capacidade de tratar panelas de 150t de aço a uma taxa de circulação de 121 t/min) e lingotamento contínuo de placas. Observaram que o número total de inclusões decresce com o tempo no caso das inclusões líquidas e não líquidas, e a taxa de remoção de inclusões pode chegar até 72% após 28 minutos de tratamento. Segundo os autores, isso se deve à coagulação e remoção das inclusões para a camada de escória acima da panela de aço ou para a superfície livre acima do aço dentro do vaso do RH.

Utilizando a contagem de inclusões em microscópio e a análise do oxigênio total das amostras industriais, Lascosqui [10] avaliou a influência do tempo de circulação do aço durante o tratamento no RH no seu grau de limpidez. Além disso, simulou o escoamento do aço líquido durante o tratamento no RH através do software CFX™ e desenvolveu um modelo de remoção das inclusões. Concluiu, de acordo com a Figura 2, que após 300 segundos a concentração de inclusões atingida é praticamente a mesma em todos os casos.

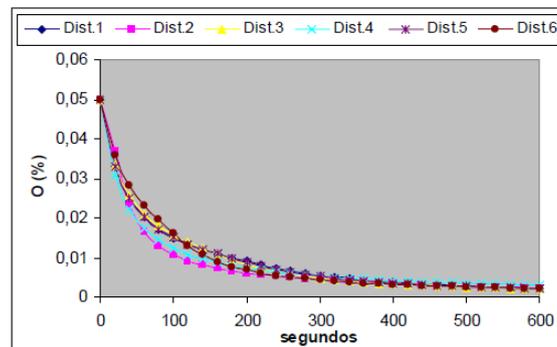


Figura 2 - Evolução do Oxigênio Total para 06 condições iniciais distintas [10]

Ambos os processos de rinsagem e de desagaseificação RH podem ser empregados para a remoção de inclusões. Entretanto, apesar de discutir-se o mecanismo de remoção de inclusões, as comparações entre os dois processos são escassas e pouco se discute a respeito da necessidade de se utilizar um processo ou o outro para atingir determinado nível de limpidez do aço, visto que o processo de RH é, comumente, muito mais oneroso do que o processo de rinsagem.

O presente trabalho visa discutir sobre a escolha do processo a ser utilizado e do tempo de tratamento necessário para a produção de cada aço, de forma a atingir a qualidade do produto desejada, onerando o mínimo possível o processo de produção.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Simulações matemáticas

Foram realizados modelamentos matemáticos do fluxo de aço numa panela de 224t de aço líquido para os processos de borbulhamento com vazão de gás de 250NL/min e no desgaseificador RH com vazão de gás de 100Nm<sup>3</sup>/h. Empregou-se o *software* CFX 19.1 (Ansys®) e o modelo modelo k-ε de turbulência para fase contínua (líquido), enquanto para a fase discreta (gás), adota-se o modelo de equação zero de fase dispersa (*Dispersed Phase Zero Equation*). Para o reator RH foram adotados os modelos de Ishii-Zuber para a força de arraste, coeficiente da força de massa virtual igual a 0,25, modelo de Frank para a força de lubrificação da parede e média de Favre (ou média ponderada pela massa) da força de arraste para a força de dispersão turbulenta, conforme o trabalho de Peixoto [11]. Para a simulação do borbulhamento na panela, foram consideradas apenas as forças de arraste e de dispersão turbulenta. As propriedades do aço e do argônio utilizadas nas simulações podem ser encontradas em Peixoto [11]. Desta forma, foi possível avaliar o perfil de velocidades, e a taxa de dissipação de energia cinética de turbulência, conforme apresentado nas Figuras 3 e 4.

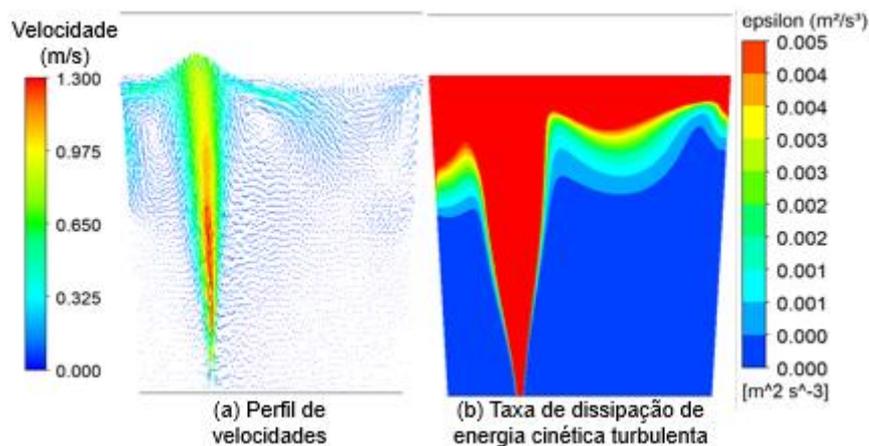


Figura 3 – Resultado da simulação matemática da estação de borbulhamento;

Como fruto da simulação do desgaseificador RH, pela consideração da expansão do gás, conforme adotado por Peixoto [11], obteve-se uma taxa de circulação de 104,4t/min, e o perfil de velocidades e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta no plano de simetria podem ser observados na Figura 4. Nota-se que o RH apresenta maior taxa de dissipação de energia cinética turbulenta na região da perna de subida, abaixo da perna de descida e região inferior da panela. Já na estação de borbulhamento esta região se limita somente à região da pluma e à parte superior da panela. As regiões onde se observa alta taxa de dissipação de energia cinética turbulenta são importantes porque são locais onde o choque e coalescimento das inclusões (fenômenos de extrema importância para a sua remoção conforme mencionado anteriormente) são favorecidos.

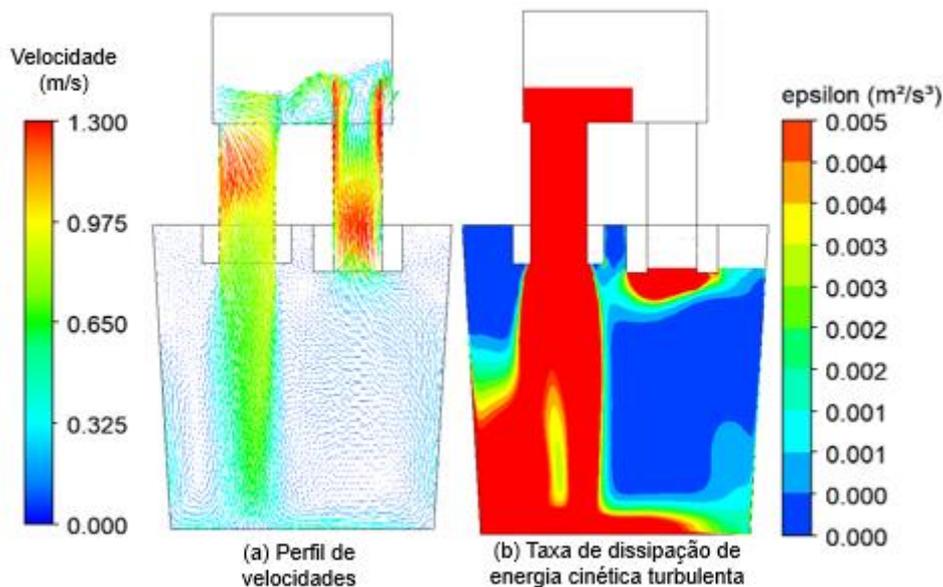


Figura 4 - Resultado da simulação matemática do RH.

Na região inferior da panela (fora da zona da pluma) os níveis de velocidade são muito baixos, sendo que o choque e coalescimento de inclusões seriam de extrema importância para acelerar a flotação das inclusões.

Além disso, de acordo com as linhas de fluxo e o perfil de velocidades, observa-se que o fluxo no RH pode propiciar a flotação de inclusões para a escória sobrenadante enquanto, no caso da estação de borbulhamento, o perfil e velocidade do fluxo sugerem uma maior tendência à recirculação do que no RH.

## 2.2. Testes industriais

Os aços avaliados no trabalho são aços acalmados ao alumínio e silício para a produção de chapas grossas para a construção civil.

Produziu-se duas corridas seguindo a rota:

convertedor LD – desgaseificador RH – máquina de lingotamento de placas

e outras duas corridas seguindo a rota:

convertedor LD – estação de borbulhamento – máquina de lingotamento de placas

Nas quatro corridas, retirou-se amostras de aço manualmente em diferentes momentos dos tratamentos (conforme mostram as figuras 5 a 8), as quais foram preparadas por meio de lixamento e polimento conforme a norma ASTM E3. Em seguida, foram feitas análises para caracterização e contagem das inclusões, em um MEV/EDS com um *software* de análise de inclusões, em uma área de escaneamento de  $2,33 \times 10^7 \mu\text{m}^2$  (foram desclassificadas as inclusões com diâmetro menor que  $2 \mu\text{m}$ ). O momento das amostragens e caracterização das inclusões pode ser observado nas figuras seguintes.

### 2.2.1. Resultados das corridas tratadas na estação de borbulhamento

-Corrida 1:

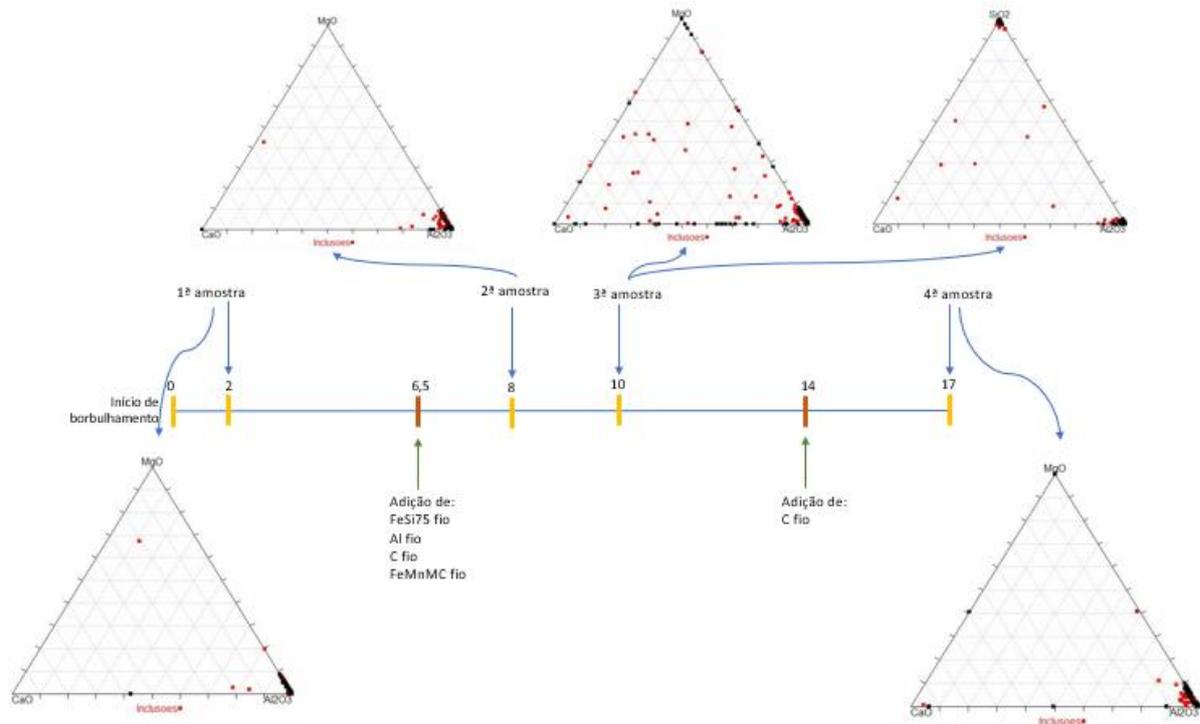


Figura 5 – Resultado do tratamento e amostras da corrida 1 (tratada na estação de borbulhamento)

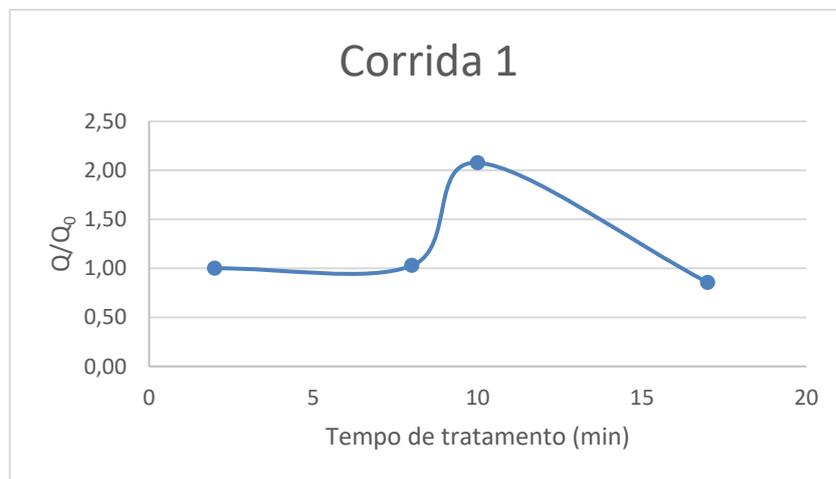


Gráfico 1 – Razão entre a quantidade de inclusões contabilizada e quantidade de inclusões inicial ( $Q/Q_0$ ) x tempo – Corrida 1

-Corrida 2:

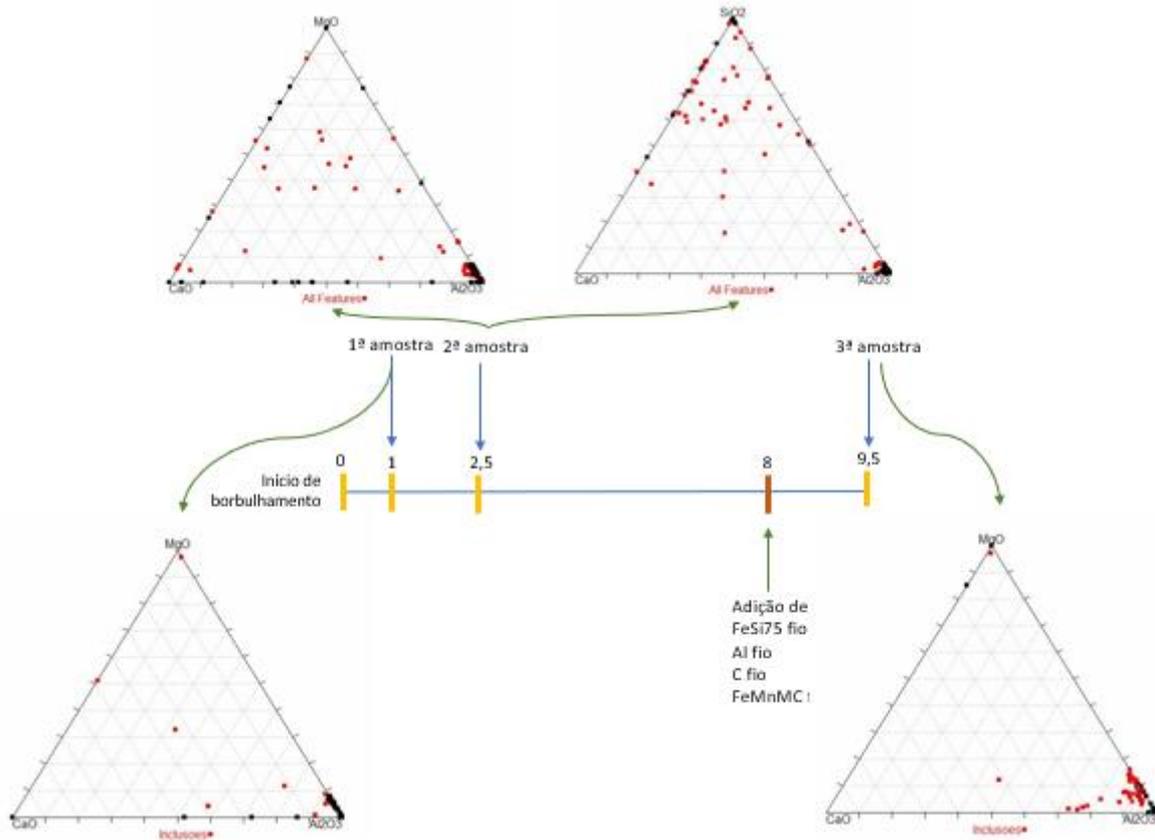


Figura 6 - Resultado do tratamento e amostras da corrida 2 (tratada na estação de borbulhamento)

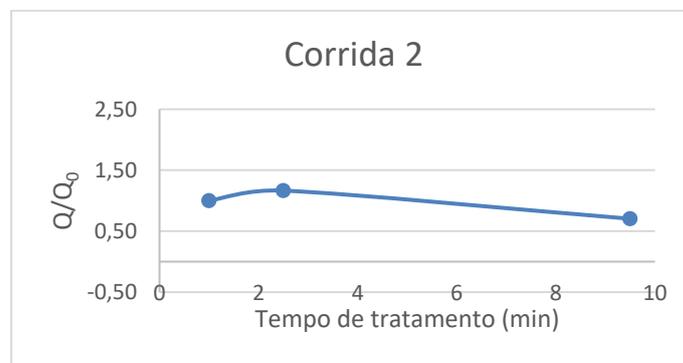


Gráfico 1 – Razão entre a quantidade de inclusões contabilizada e quantidade de inclusões inicial ( $Q/Q_0$ ) x tempo – Corrida 2

Pode-se perceber que, apesar de haver grande diferença de comportamento entre os dois tratamentos realizados, em ambos há um aumento e posterior redução na quantidade de inclusões para valores abaixo da quantidade inicial. Logo, mesmo que haja alguma geração de inclusões (que pode ser atribuída à exposição do olho de gás ao ar atmosférico e reoxidação do aço pela interação com a escória), a estação de borbulhamento se mostra capaz de reduzir o conteúdo inicial de inclusões. Esta redução, contudo, chega ao máximo a cerca de 30% do valor inicial em 10 minutos de tratamento.

### 2.2.2. Resultados das corridas tratadas no RH:

-Corrida 3:

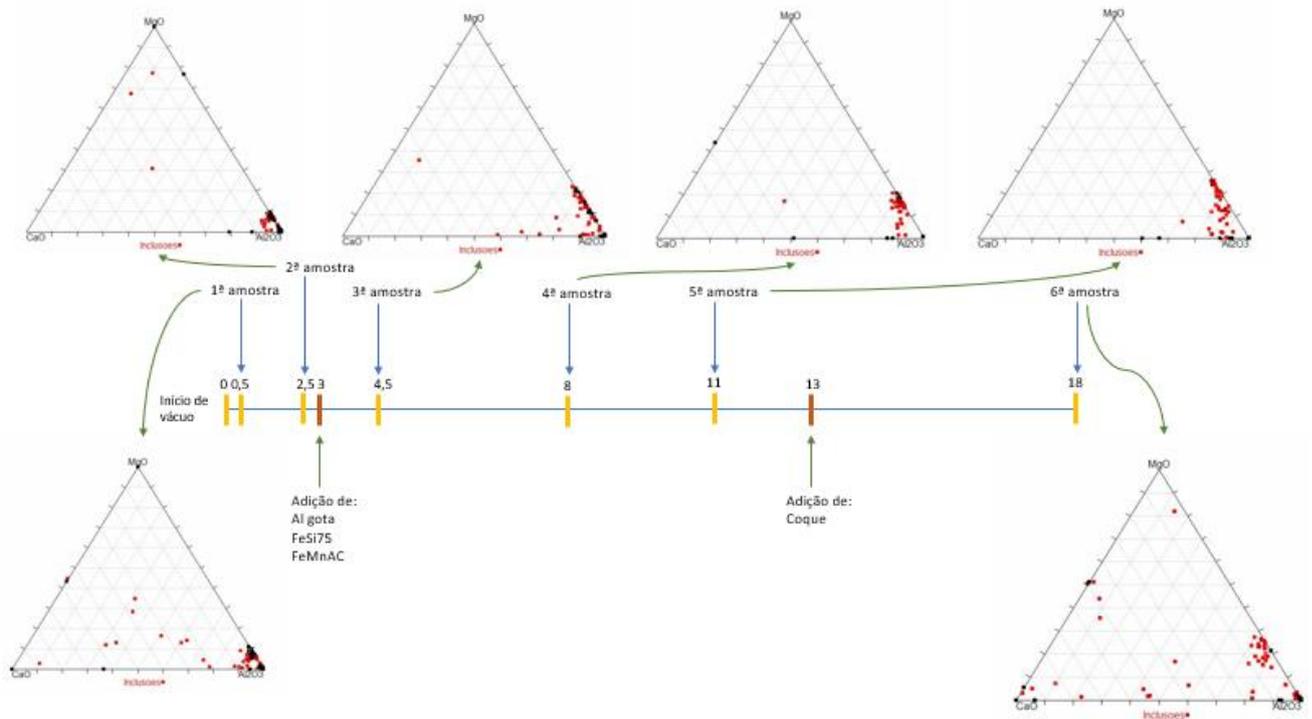


Figura 7– Resultado do tratamento e amostras da corrida 3 (tratada no RH)

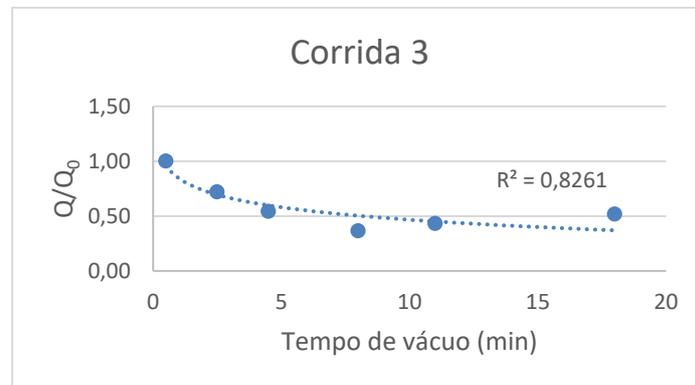


Gráfico 2 – Razão entre a quantidade de inclusões contabilizada e quantidade de inclusões inicial ( $Q/Q_0$ ) x tempo - Corrida 3

-Corrida 4:

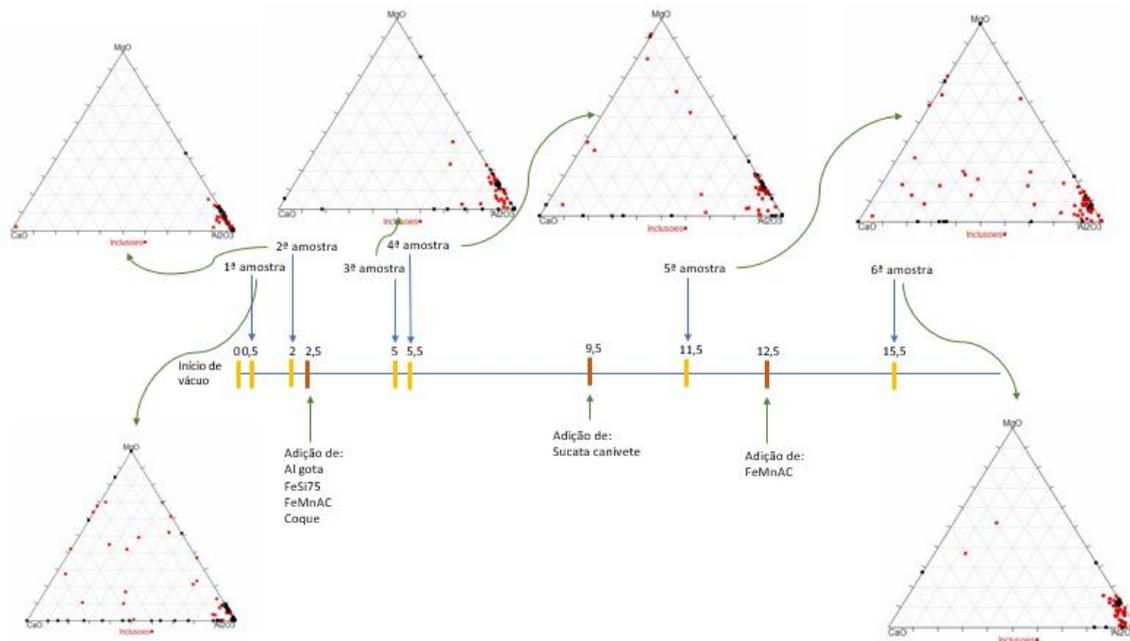


Figura 8– Resultado do tratamento e amostras da corrida 4 (tratada no RH)

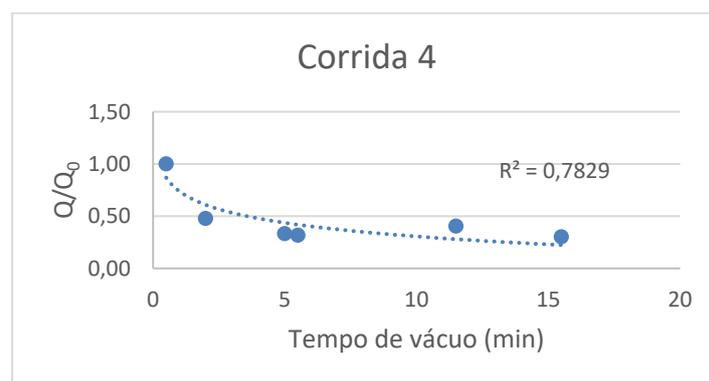


Gráfico 3 – Razão entre a quantidade de inclusões contabilizada e quantidade de inclusões inicial ( $Q/Q_0$ ) x tempo – Corrida 4

Em ambos os tratamentos no RH, cujo comportamento da remoção de inclusões é muito similar (diferentemente da estação de borbulhamento) percebe-se uma queda brusca (logarítmica) do conteúdo inicial de inclusões principalmente nos cinco primeiros minutos de vácuo e em seguida, uma menor taxa de remoção de inclusões até o fim do tratamento. Além disso, apesar de ambas as corridas possuírem quantidade inicial de inclusões mais alta do que as corridas tratadas na estação de borbulhamento, a quantidade final ficou cerca de 50 e 70% menor nas corridas 3 e 4, respectivamente, que a quantidade inicial, o que demonstra que o RH possui comportamento mais previsível e capacidade de remoção de inclusões maior do que a estação de borbulhamento.

Algumas simulações matemáticas (ver Soder[5] e Aoki[12], por exemplo) sugerem que o principal fenômeno que promove a remoção das inclusões na estação de borbulhamento pode ser a aderência das inclusões às bolhas de gás e sua posterior flotação para a escória. Já no caso do RH, o choque, coalescimento e carreamento das inclusões para a superfície do aço líquido seria o principal fenômeno.

Aoki & Thomas [12] estudaram a remoção de inclusões durante o borbulhamento de gás em uma panela de aço por meio de simulações matemáticas. Calcularam o valor da constante  $K_o$ , que reflete a velocidade desoxidação do banho (que mede indiretamente a capacidade do processo de remover inclusões). Sugeriram que este processo pode ser tão capaz de remover inclusões quanto o processo de RH, conforme se pode observar na Figura 9. Entretanto este desempenho seria alcançável com uma vazão de gás cerca de sete vezes menor que a utilizada nas corridas 1 e 2, o que sugere que, nos casos destas, a vazão excessiva de gás provocou uma competição entre o processo de remoção de inclusões e fenômenos de incorporação, como emulsificação e reoxidação pelo olho da pluma.

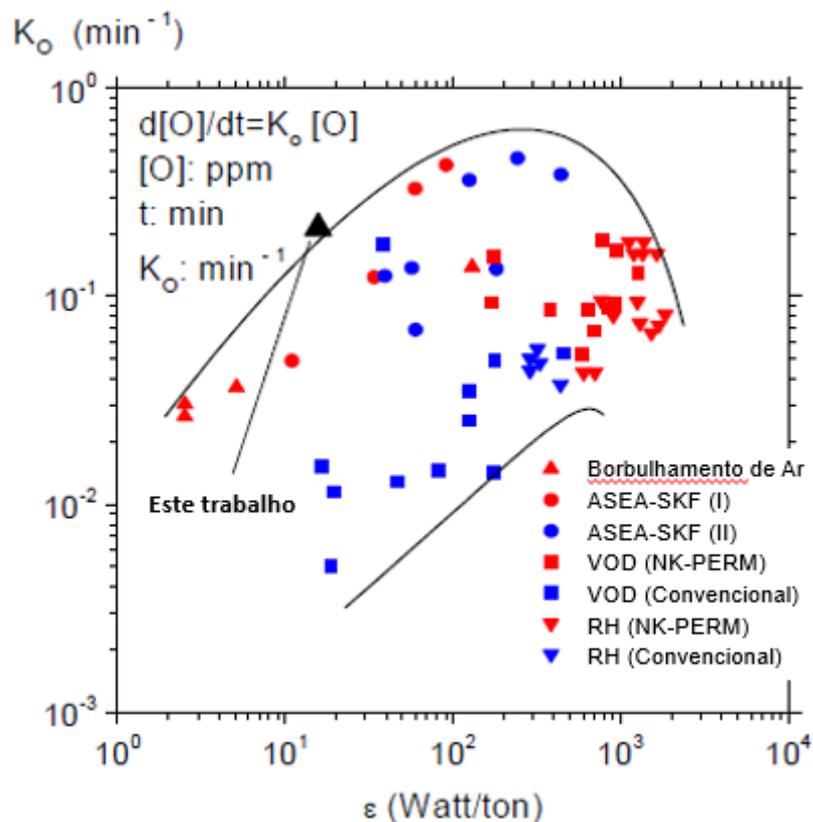


Figura 9 – Comparação entre valores de  $K_o$  em vários processos

### 3 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o fluxo de aço e a remoção de inclusões nos processos de RH e estação de borbulhamento durante o tratamento do aço líquido e mostrou que, no que tange a remoção de inclusões, apesar de o RH não ter sido concebido com a intenção principal de remover inclusões, este equipamento possui maior previsibilidade e capacidade de remoção de inclusões (em um menor tempo) em relação à estação de borbulhamento. A estação também pode ser utilizada com este objetivo, porém, para que se atinja remoção de inclusões equivalente à do processo de RH, é necessário que a vazão de gás utilizada seja muito inferior à praticada neste trabalho.

## Agradecimentos

À Gerdau pelo apoio e incentivo à realização das pesquisas e meu desenvolvimento como profissional, à REDEMAT pela oportunidade de aprendizado e ensino oferecido, aos professores DSc. Johne Jesus Mol Peixoto e PhD. Carlos Antônio da Silva pela orientação e colaboração e à Fapemig, Capes e ao CNPq pelo apoio ao laboratório.

## REFERÊNCIAS

- 1 YANG, C., TANG, F., HE, T. e FU, Q. Water Model on Fine Inclusion Removal by Bubble Flotation in RH Refining Process. Applied Mechanics and Materials, v. 528, p. 107-111, 2014.
- 2 WANG, L., LEE, H.G e H., P. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation, ISIJ International, v. 36, n. 1, p.7-16, 1996.
- 3 YANG, C., TANG, F., HE, T. e FU, Q. Physical Simulation of Inclusions Removal in 180t RH Degasser. Advanced Materials Research, v. 750-752, p. 375-379, 2013.
- 4 ZHANG, L. e TANIGUCHI, S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation. International Materials reviews v. 45, n.2, p.59-82, 2000.
- 5 SÖDER, M., JÖNSSON, P. e JONSSON, L. Inclusion Growth and Removal in Gas-stirred Ladles. Steel research int., v.75, n.2, p. 128-138, 2004.
- 6 MARINS, Â. M. F. Modelagem física e computacional do fluxo de aço em panela com agitação por gás inerte, com ênfase na separação de inclusões. 2011. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- 7 SHIRABE, K. e SZEKELY, J. A Mathematical Model of Fluid Flow and Inclusion Coalescence in the RH Vacuum Degassing System. Transactions ISIJ, v. 23, p. 465-474, 1983.
- 8 MIKI, Y., THOMAS, B.G, DENISSOV, A. e SHIMADA, Y. Model of Inclusion Removal During RH Degassing of Steel. Iron and Steelmaker, v. 24, n. 8, p. 31-38, 1997.
- 9 YANG, G. WANG, X., HUANG, F. WANG, W. e YIN, Y. Transient Inclusion Evolution During RH Degassing. Steel Research International, v.84, n. 9999, p. 1-9, 2013.
- 10 LASCOSQUI, P. S. B. Avaliação da limpidez do aço líquido através da modelagem matemática do desgaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST. 2006. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- 11 PEIXOTO, Johne Jesus Mol. Análise da Turbulência e do Comportamento Metal-Escória no Interior de um Reator RH e sua Influência sobre a Reação de Dessulfuração do Aço. 2019. 205 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, 2019.
- 12 AOKI,Jun. ZHANG,Lifeng e THOMAS, Brian G. Modelling of Inclusion Removal in Ladle Refining. University of Illinois, Illinois. 2005.