

ANÁLISE DO EFEITO DA INJEÇÃO DE GÁS NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM UM DISTRIBUIDOR COM DIQUES E BARRAGENS*

Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça¹
Filipe Alvarenga Araújo²
Melissa Souza de Faria³
Adrielle Cintra Filgueira³
Gisele Márcia de Souza⁴
Roberto Parreiras Tavares⁵

Resumo

A injeção de gás em distribuidor é uma alternativa para aperfeiçoar a remoção de inclusões do aço. Estudos utilizando modelamentos físico e matemático vêm sendo desenvolvidos visando avaliar os efeitos da injeção de gás e sua interação com as inclusões. Com esse embasamento, é pertinente investigar o efeito da vazão do gás e a localização do sistema de injeção na eficiência de remoção de inclusões. Sob essa perspectiva, foi usado um modelo físico em escala 1:3 de um distribuidor industrial de 40 toneladas para analisar o efeito da injeção de gás. Os experimentos incluíram análise de curvas DTR e contagem *on-line* de partículas pela sonda APS III. O resultado mostrou que somente as análises exclusivas dos volumes característicos obtidos das curvas DTR não são adequadas para avaliar a remoção de inclusões. Todavia, o resultado da sonda APS III não só comprovou que a injeção de gás promove a remoção de inclusões, como também indicou a melhor configuração interna objetivando a máxima eficiência.

Palavras-chave: Distribuidor; Injeção de gás; Remoção de Inclusões; Modelamento físico.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF GAS INJECTION ON THE INCLUSION REMOVAL EFFICIENCY IN A TUNDISH WITH WEIRS AND DAMS

Abstract

Gas injection in tundish has been considered as an alternative to optimize inclusion removal from the steel. Studies using physical and mathematical modeling have been developed to evaluate the effect of injection and its interactions with inclusions. With this foundation, it is pertinent to investigate the effect of gas flow rate and location of the gas injection system on the inclusion removal efficiency. From this perspective, a physical model built in a 1:3 scale of an industrial tundish of 40 tonnes, was used to analyze the effect of gas injection. The experiments included analysis RTD curves and online particle counts by APS III probe. The results showed that only the exclusive analyzes of the characteristic volumes obtained from the RTD curves are not adequate to evaluate the inclusions removal. However, the result of the APS III probe not only proved that the gas injection promotes the inclusions removal, but also indicated the best internal configuration aiming at the maximum efficiency of inclusions removal.

Keywords: Tundish; Gas injection; Inclusion removal; Physical modeling.

¹ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia Extrativa, CQE/ASQ, Estudante do Programa de Pós-Graduação em Estatística da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, freitasgm@ufmg.br.

² Engenheiro Metalurgista, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Estudante de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheira Química, Mestranda, PPGEM/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalurgista, PhD, Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Membro da ABM, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A produção do aço é feita na aciaria LD em três etapas de processamento: refino primário, refino de panela (metalurgia secundária) e o lingotamento contínuo. As etapas de refino focam na composição química, limpidez e ajuste de temperatura do aço líquido para o lingotamento. Esse último processo, por sua vez, é responsável pela solidificação do aço líquido de forma controlada para atender aspectos superficiais e internos de produto.

Após as etapas de refino, é desejável que o aço líquido apresente um nível de inclusões que não comprometa a lingotabilidade, e principalmente, a qualidade interna e superficial do produto final. Inúmeras técnicas são aplicadas para o controle de inclusões nos refinamentos e no lingotamento. No lingotamento, em particular, o distribuidor pode ser projetado para desempenhar esse papel, além das funções originais de reservatório e distribuição do aço líquido.

Para maximizar a flotação de inclusões em um distribuidor, é conveniente inserir modificadores de fluxo em seu interior, como diques, barragens, inibidores de turbulência, dentre outros. Em geral, esses modificadores são estruturas sólidas que atuam como obstáculos físicos e alteram o perfil de escoamento, agregando ao aço melhor qualidade. Além dos modificadores de fluxo citados, o uso de cortina de gás [1] pode também desempenhar papel similar e potencializar a flotação de inclusões.

Na indústria, a cortina de gás pode ser criada pela colocação de um elemento poroso na base do distribuidor que é alimentado pela injeção de um gás inerte, normalmente argônio. O elemento poroso, ao desprender gás argônio, cria uma série de bolhas de gás que sobem até a superfície do aço líquido no distribuidor. Durante a ascensão das bolhas, elas, ao colidirem com as partículas de inclusões não metálicas dentro do ângulo de captura, conduzem essas partículas para a escória do distribuidor em um processo similar ao de flotação [2].

Com base na importância desse fato, a remoção de inclusões no distribuidor de lingotamento contínuo tem sido investigada por meio de modelamentos físicos e matemáticos. A injeção de gás no distribuidor tem sido considerada como uma alternativa para aperfeiçoar a remoção de inclusões do aço líquido. Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos analisando os efeitos da injeção de gás e sua interação com as inclusões [3-6]. Contudo, ainda há espaço para mais investigações envolvendo o efeito da vazão do gás, da localização do sistema de injeção de gás e das dimensões das bolhas na eficiência de remoção de inclusões.

O presente trabalho buscou elucidar as mudanças geradas do sistema, submetido à injeção de gás, assim como, determinar a melhor configuração do distribuidor com diques e barragens para a flotação de inclusões submetidas a três níveis de posicionamento do plugue poroso e a cinco níveis de vazão de gás para cada posição de plugue. A eficiência de remoção de inclusões foi analisada pelo emprego da sonda de contagem de inclusões APS III, *Aqueous Particle Sensor 3*. As inclusões foram simuladas por microesferas ocas de vidro de borossilicato, de tamanho conhecido e vazão de injeção da polpa de inclusões controlada. A sonda APS III fez a contagem *on-line* de inclusões na saída do veio. Adicionalmente, a análise dos volumes característicos foi feita através do levantamento de curvas de distribuição de tempos de residência, DTR [7]. E por fim, foram confrontados a eficiência de remoção efetiva com os parâmetros de escoamento obtidos pelas curvas DTR, e apontada qual configuração é mais adequada para a injeção de gás.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Modelo físico do distribuidor

O modelo físico do distribuidor utilizado encontra-se instalado no Laboratório de Simulação de Processos, LaSiP, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais. Ele foi construído em acrílico na escala reduzida de 1:3 de um distribuidor real em operação e possui uma válvula de entrada e duas de saída. O modelo físico respeita os aspectos de similaridade [8] geométrica e dinâmica. Dessa forma é possível fazer inferências do comportamento do escoamento pela aplicação de técnicas específicas e transportar o resultado para o ambiente industrial, o que elimina a necessidade de fazer testes diretamente na planta. A transposição do modelo físico para o industrial, e vice-versa, foi feita através do critério de similaridade baseado no número de Froude.

A geometria e dimensões do modelo físico do distribuidor que foi usado para o presente estudo podem ser verificadas na Figura 1.

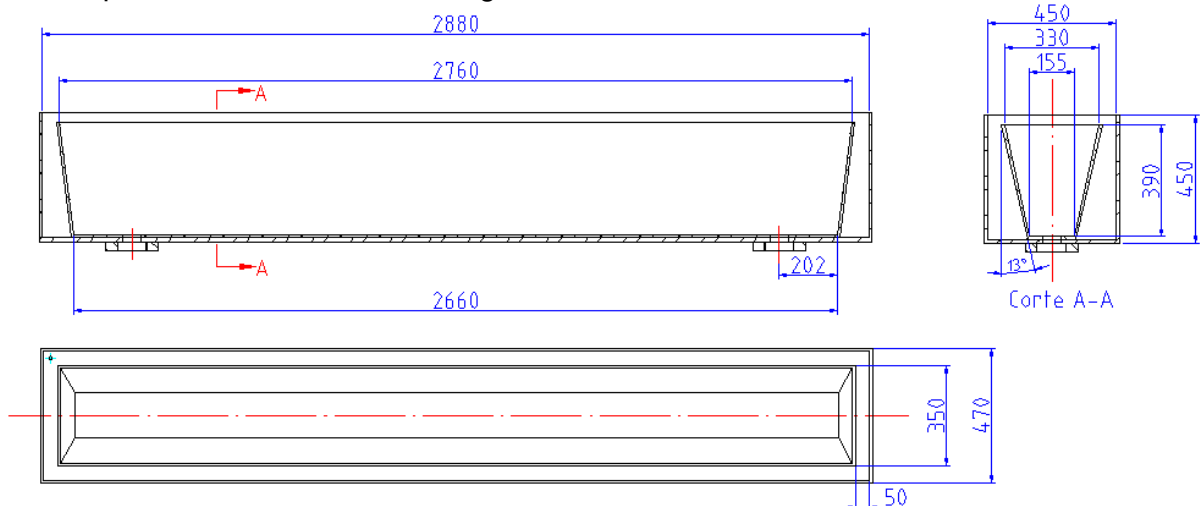


Figura 1. Desenho técnico do modelo físico do distribuidor (dimensões em mm).

A operação do modelo físico é automatizada e integrada por um sistema de cartões de entrada e saída monitorados e controlados pelo programa *SoftPLC*, que emula o funcionamento de um CLP (Controlador Lógico Programável). Os sistemas de controle e supervisão controlam as seguintes variáveis:

- vazão de alimentação do distribuidor;
- nível de líquido no distribuidor.

Os posicionamentos dos diques e barragens empregados podem ser vistos na Figura 2.

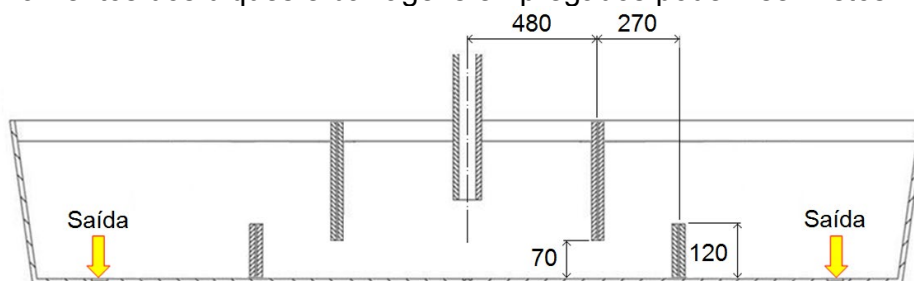


Figura 2. Desenho do posicionamento dos diques e barragens (em mm) no distribuidor.

2.2 Condição de operação dos ensaios

O distribuidor foi preenchido com um volume de 167 litros de água (correspondendo a 31,7 toneladas de aço no distribuidor) atendendo os critérios de similaridade. Depois de estabelecido o nível de operação, os veios foram abertos, permitindo que a soma das vazões de saída fosse a mesma de entrada, mantendo assim uma coluna de água constante no distribuidor. Para a injeção de gás, dois plugues porosos foram instalados na base do distribuidor e equidistantes em relação à válvula longa. Na Figura 3 é ilustrada a superfície de um plugue usado. Foram testadas três posições de plugue: 28, 56 e 84cm, todos em relação à entrada do sistema. As vazões de gás injetadas foram: 1, 2, 3, 4 e 8NI/min. Para cada combinação de posição de plugue e vazão de gás estudada, foram feitos testes com repetições. A vazão de água na entrada do distribuidor foi mantida em 50 l/min (o equivalente a 5,48t/min da panela para o distribuidor industrial). A saída em cada veio operou com 25 l/min, correspondente a uma vazão mássica de aço de 2,74t/min por veio.



Figura 3. Elemento poroso de dimensões (20x150x20)mm usado no plugue.

A cortina de gás teve sua origem em elementos porosos de dimensões controladas, alimentados por gás, nesse caso por ar atmosférico comprimido. A vazão de ar comprimido foi controlada por rotâmetro e a pressão da linha por um manômetro. Na Figura 4 é apresentado um exemplo de cortina gás formada a partir da superfície porosa do plugue (150mm de extensão) até a altura da barragem (aproximadamente 100mm).



Figura 4. Aspecto de uma cortina de gás formada no plugue poroso, para a vazão de 8,0NI/min.

2.3 Avaliação da eficiência de remoção de partículas pela aplicação do sensor APS III

A avaliação da eficiência de remoção das inclusões foi feita pela aplicação da sonda APS III, *Aqueous Particle Sensor 3*, que faz a contagem *on-line* de partículas durante o ensaio. Essa sonda é mostrada na Figura 5.

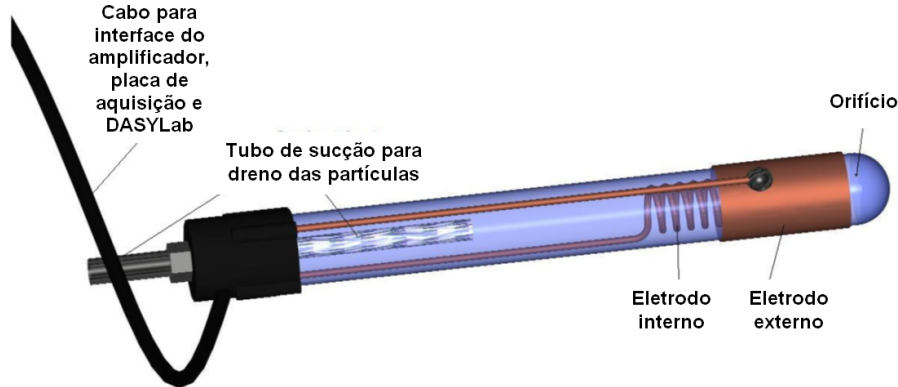


Figura 5. APS III - *Aqueous Particle Sensor 3* [9].

Chakraborty [9] apresentou o princípio de funcionamento da forma de detecção de partículas pela Zona de Sensibilidade Elétrica da APS III. Ela se baseia na existência de uma diferença na condutividade elétrica entre a partícula e o fluido de trabalho.

Na Figura 6 é mostrado o princípio de funcionamento da APS III. O fluido, que contém uma suspensão de partículas simulando inclusão, passa através de um orifício estreito de tamanho conhecido. Dois eletrodos são utilizados para aplicar uma corrente elétrica constante (I) através do orifício. Quando o orifício não contém partículas, a resistência (R) entre os eletrodos é devida apenas ao fluido condutor. Isso produz uma diferença de potencial $V_0 = (RI)$ através dos eletrodos, que é registrada como a saída de linha de referência para a ausência de partículas. Nesse momento, considere que uma única partícula passe pelo orifício, ou pela Zona de Sensibilidade Elétrica, deslocando, assim, o seu próprio volume de fluido. Uma vez que o fluido condutor no orifício é agora substituído por uma partícula eletricamente isolante, a resistência através do orifício altera para $(R + \Delta R)$ e a diferença de potencial através dos eletrodos salta para $V_1 = (R + \Delta R)I$. Esse salto de tensão, quando a partícula passa através do orifício, é gravado e a sua magnitude é a indicação do tamanho da partícula [10-11].

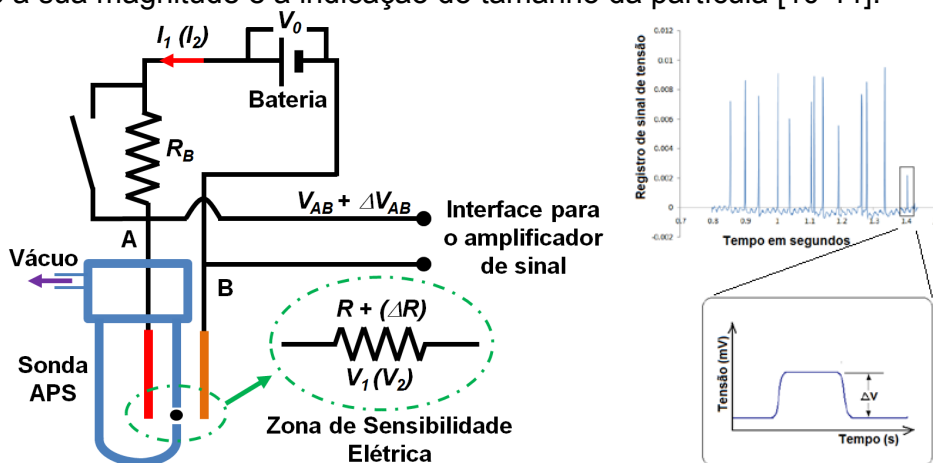


Figura 6. Princípio da Zona de Sensibilidade Elétrica [9].

Cada teste (de posição de plugue com a vazão de gás) foi feito em triplicata com um sensor APS III. As condições empregadas foram:

- a) Teste de bancada da APS III, para referência da densidade e distribuição de tamanho de partículas no fluxo de entrada do distribuidor (*off-line*);
- b) Com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens e sem injeção de gás;
- c) Com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens e com injeção de gás por plugue poroso.

Na Figura 7 é apresentado esquematicamente cada posicionamento de plugue no modelo físico, e a localização da sonda APS III e dos condutivímetros.

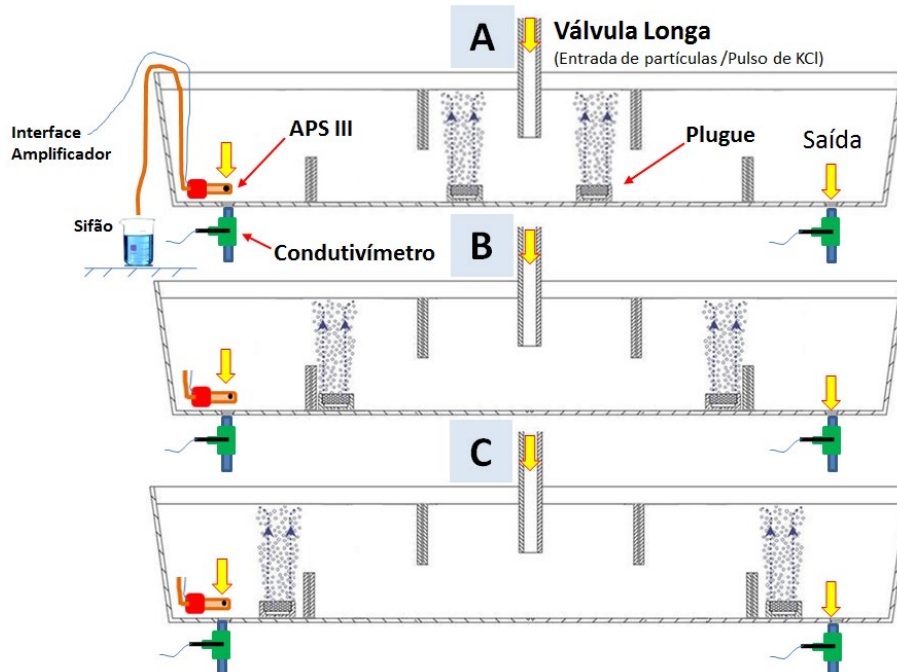


Figura 7. Posicionamento simétrico dos plugues no distribuidor com diques e barragens para A: 28cm, B: 56cm e C: 84cm, todos em relação a válvula longa.

Microesferas ocas de borossilicato foram usadas para simular as inclusões, e elas foram injetadas na entrada da válvula longa por uma bomba peristáltica. A poupa de partículas usada tinha a concentração de 1g/l e foi injetada com a vazão de 68ml/min no sistema. A especificação da distribuição granulométrica passante das partículas é: 20 μ m (10%); 38 μ m (50%); 60 μ m (90%) e 68 μ m (97%), e simulam a ação de partículas inclusionárias na escala industrial [12] de 28, 54, 85 e 96 μ m respectivamente.

Cada ensaio teve duração aproximada de 6 tempos de residência teóricos, tempo esse definido por Sahai [7]. O cálculo de eficiência de remoção de partículas foi feito conforme metodologia aplicada por Chakraborty [9].

2.4 Determinação das Curvas DTR

Para a realização dos testes relativos à obtenção das curvas DTR, em cada saída de veio foi conectado um sensor de condutividade elétrica. Depois de estabelecida a altura padrão de água no distribuidor e garantida à estabilidade dessa altura, regime estacionário de escoamento, foi feita a injeção na entrada da válvula longa da solução aquosa contendo o traçador iônico de cloreto de potássio, na forma de um pulso com duração inferior a 2 segundos. Esse traçador altera a condutividade elétrica da água, fazendo com que os sensores de condutividade detectem essa variação em função do tempo, que mais tarde foi transformada em concentração através de uma curva de calibração. O tratamento dos dados de variação de condutividade em função do tempo permite a determinação da curva DTR. Em geral, o tempo de aquisição de dados durou 4 tempos de residência teóricos do distribuidor. Durante todo o ensaio, os condutivíme-

tros permaneceram conectados a um computador, onde foram registrados os dados experimentais.

Para cada ensaio, foi obtida uma curva DTR específica normalizada em função do tempo e da concentração, ambos adimensionais. Os valores das frações dos volumes característicos (pistonado, morto e mistura) foram extraídos de sua respectiva curva DTR conforme metodologia descrita por Sahai e Emi [7].

As curvas DTR foram levantadas para a melhor posição de plugue combinadas as vazões de gás injetadas na avaliação da eficiência de remoção de partículas por meio da sonda APS III.

Cada teste variando a vazão de gás foi feito em triplicata com dois sensores de condutividade, gerando seis resultados. As condições empregadas foram:

- Com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens e sem injeção de gás;
- Com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens e com injeção de gás por plugue poroso.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação da eficiência de remoção de partículas via sonda APS III

Avaliou-se a eficiência de remoção de inclusões para o distribuidor com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens. Os ensaios foram feitos com três repetições, para três níveis de posição de plugue: 28, 56 e 84cm de afastamento da válvula longa, e para cinco níveis de vazão de gás: 1, 2, 3, 4 e 8NI/min. Na Figura 8 é comparada a eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios e a referência sem injeção de gás, a partir da média amostral de cada grupo de ensaios com injeção de gás e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança.

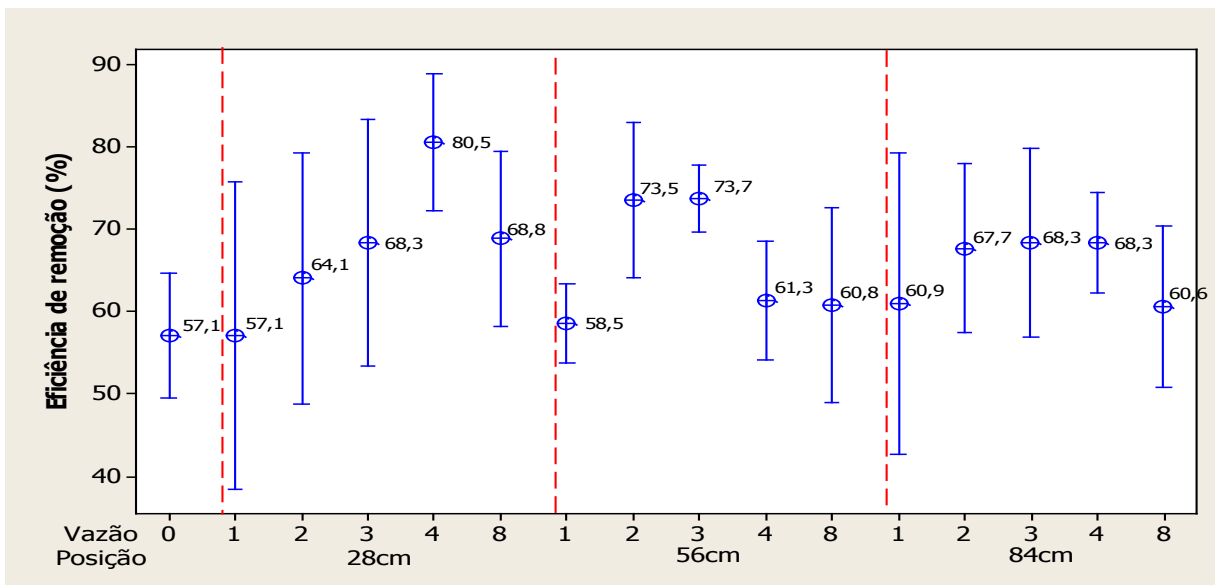


Figura 8. Comparação da eficiência de remoção de partículas do distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás, variando a posição e vazão de plugue.

Na Figura 8 é apresentada evidência estatística, com nível de significância de 5%, de que a vazão de gás injetada afetou a eficiência de remoção de inclusões do distribuidor com modificadores de fluxo, para as configurações:

- Plugue a 28cm da válvula longa para a vazão de 4NI/min;
- Plugue a 56cm da válvula longa para a vazão de 3NI/min.

Entretanto, o comportamento das médias para cada combinação de posição de plugue e vazão de gás sinaliza a tendência geral da eficiência de remoção de inclusões do distribuidor. Para a posição de plugue a 28cm, observa-se uma elevação gradual da eficiência de remoção com o aumento da vazão de gás até 4NI/min, mas esse comportamento é revertido com a estrapolação da vazão para 8NI/min. Apesar da vazão de 4NI/min apresentar o melhor resultado isolado do sistema, os demais resultados nessa posição 28cm apresentam variabilidade acima da observada sem injeção de gás. Assim, conjectura-se que isso se deve a energia turbulenta nessa região devida a entrada da vazão no distribuidor, o que não promove um resultado robusto. A configuração intermediária sugere a existência de um máximo entre as vazões de 2 e 3NI/min, e por fim, a posição mais afastada, a 84cm, sinaliza uma tendência de variação pouco representativa na eficiência de remoção com o aumento da vazão.

Em particular, a vazão de 1NI/min não potencializou a formação homogênea da cortina, deixando-a poucos sítios de desprendimento de bolhas e fluxo gasoso desbalanceado. Já a vazão de 8NI/min, para qualquer posição de plugue, não apresentou melhoria de desempenho médio na eficiência de remoção de inclusões, mostrando uma tendência geral de queda de desempenho na eficiência de remoção em relação às vazões menores. Fato esse que confirma a existência de uma vazão ótima para a eficiência de remoção de inclusões. Dois aspectos podem estar contribuindo para a redução da eficiência com aumento excessivo de vazão, o primeiro é uma possível reversão das partículas da superfície para o banho e, o segundo, o fato da existência de um excesso de energia no fluxo que não está permitindo a liberação das inclusões para a superfície do banho, ou até mesmo, a combinação desses fatores. Assim, um controle apurado do sistema de injeção de gás é requerido para a manutenção da eficiência do plugue e da qualidade do aço.

Para modelar o comportamento geral da eficiência de remoção de inclusões do sistema em estudo, criou-se a Figura 9, com base nos resultados de eficiência de remoção dos dados que deram origem a Figura 8. Ela apresenta um gráfico das curvas de nível da superfície de resposta com linhas de isoeficiências de remoção de partículas, em função dos fatores vazão de gás e posição de plugue.

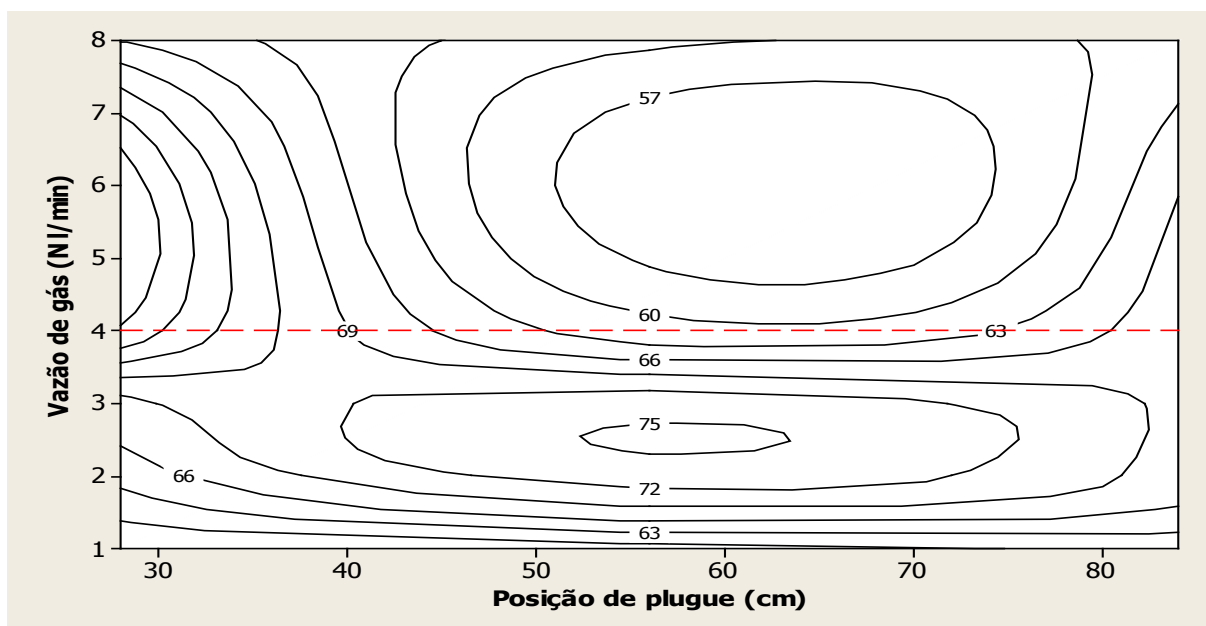


Figura 9. Curvas de nível da superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor com modificadores de fluxo, e com injeção de gás de 1 a 8NI/min para as posições variando entre 28 a 84cm de afastamento da válvula longa.

Constata-se pela Figura 9 a existência de uma região central onde a eficiência superou 75% de remoção de inclusões, entre as posições de plugue de 52 a 63cm da válvula longa e numa janela de vazão de 2,2 a 2,8NI/min. Pelo aspecto qualitativo do fluxo da cortina, tanto a energia turbulenta local quanto o volume de gás gasto pelo sistema são relativamente baixos quando comparados as vazões máximas estudadas. Isso concorre para a não reversão de inclusões e/ou escória para o banho metálico pelo mecanismo de arraste induzido pelo afloramento do gás na interface metal/escória.

Para uma análise mais fundamentada, empregou-se a técnica da análise de variância (ANOVA) para a eficiência de remoção de partículas. A Figura 10, referente à ANOVA, foi obtida do software Minitab16.

Modelo linear geral para a Eficiência de remoção de partículas vs. Vazão de gás e Posição de plugue, para distribuidor com diques e barragens.

Fator	Tipo	Nível	Valores
Vazão de gás (NI/min)	fixado	5	1; 2; 3; 4; 8
Posição de plugue (cm)	fixado	3	28; 56; 84

Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas, usando ajuste SS para os testes

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vazão de gás	4	0,087006	0,087006	0,021751	10,06	0,000
Posição de plugue	2	0,005885	0,005885	0,002942	1,36	0,272
Vazão*Posição	8	0,085294	0,085294	0,010662	4,93	0,001
Erro	30	0,064863	0,064863	0,002162		
Total	44	0,243048				

S = 0,0464984 $R^2 = 73,31\%$ $R^2(\text{adj}) = 60,86\%$

Figura 10. Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Pela análise da ANOVA exposta na Figura 10 conclui-se que o fator vazão, e sua interação com a posição, têm efeito significativo sobre a variável resposta eficiência de remoção, uma vez que os p-valores se apresentaram menores que o nível de significância de 5%, e estão na região de rejeição da hipótese nula de que os efeitos não são significativos. Mesmo o fator posição não tendo efeito significativo na eficiência de remoção, uma vez que sua interação com a vazão é significativa, ele é ainda de alguma forma importante e não pode ser desconsiderado.

Na última linha da ANOVA pode-se ver o desvio padrão amostral (S), o coeficiente de determinação R^2 e o coeficiente de determinação ajustado R^2 (adj). O coeficiente de determinação R^2 expressa que 73,31% do resultado da eficiência de remoção aqui observado é explicado pelos fatores estudados. A fração complementar de R^2 faz referência aos ruídos do sistema, ou seja, variáveis não controladas, mas também é válido salientar que a própria turbulência do escoamento introduz alguma variabilidade no sistema, de forma que o R^2 nunca será 1, mesmo com todas as variáveis externas (temperatura, condutividade da água, ruídos elétricos, etc.) controladas. Por fim, o coeficiente de determinação ajustado R^2 (adj) corrige o coeficiente de determinação original levando em consideração o tamanho da amostra.

Na Figura 11 é apresentada a análise dos efeitos principais na eficiência de remoção de partículas para as configurações estudadas do distribuidor com diques e barragens.

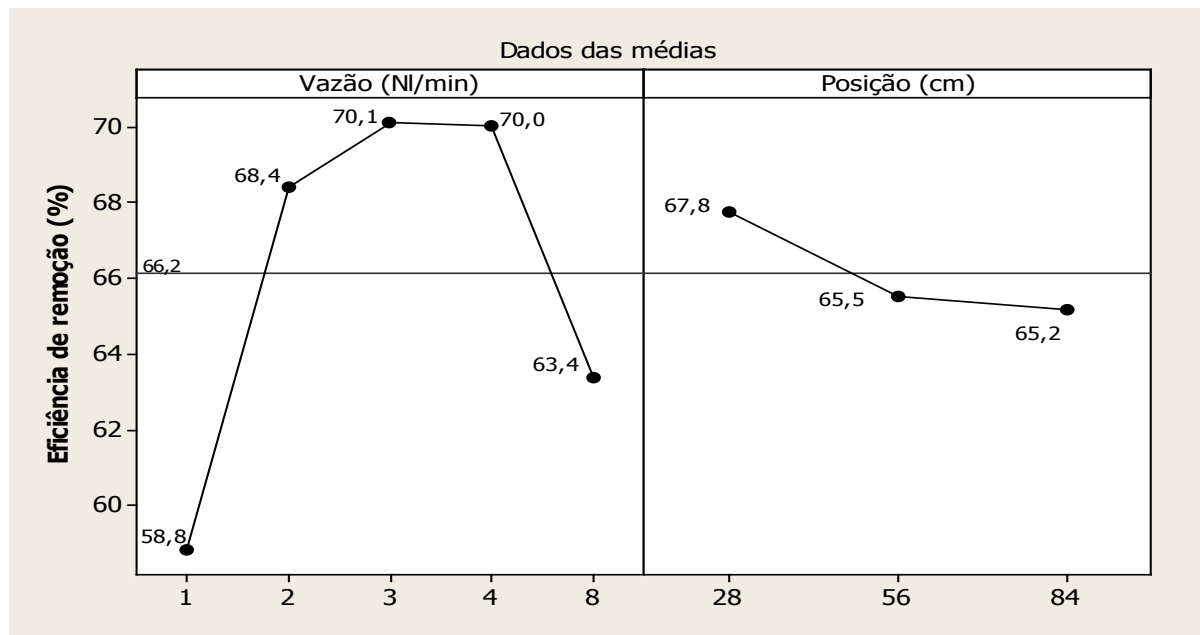


Figura 11. Análise dos efeitos principais na eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Na Figura 11 são exibidos os efeitos principais dos dois fatores desse sistema em estudo: vazão de gás e posição de plugue. Com relação à vazão, observa-se que a eficiência de remoção teve uma queda com a entrada da vazão 8NI/min, abandonando o seu comportamento de crescimento entre as vazões de 1 a 3NI/min, e de estabilidade entre 3 a 4NI/min. Com relação à posição de plugue, observa-se que ela não influenciou na variável resposta eficiência, como previsto pela análise da ANOVA apresentada na Figura 10. Essa afirmação torna-se mais notável uma vez que essa ANOVA apresentou o maior valor de F (relação entre sinal e ruído) para a vazão de gás. Pela análise das intensidades, o fator vazão de gás foi o que mais contribuiu favoravelmente para a eficiência de remoção de partículas, e em particular, a vazão de plugue de 3NI/min foi a mais relevante e tem maior poder de explicação estatística. Outro aspecto relevante é a maior faixa (*range*) de variação de eficiência vista entre as vazões de 1 a 3NI/min (que também se traduz nos maiores afastamentos médios da média global), que conduz a inclinação mais acentuada do fator vazão.

3.2 Volumes característicos e eficiência de remoção de inclusões

A razão entre o volume pistonado e o volume morto é um índice para o estudo da remoção de inclusões a partir do ensaio de distribuição de tempo de residência [13]. Como o volume pistonado auxilia no direcionamento das inclusões à escória em escoamentos preferencialmente ascendentes e o volume morto diminui o tempo de residência do aço (prejudicial à flotação das inclusões), deseja-se que o primeiro aumente o máximo possível e o último diminua. Logo, quanto maior for a razão entre esses volumes, melhor seriam as condições de flotação de inclusões.

Na Figura 12 é exibida a correlação entre a eficiência de remoção de partículas e a razão entre o volume pistonado e volume morto para a posição de plugue que apresentou o melhor desempenho quanto à remoção de partículas.

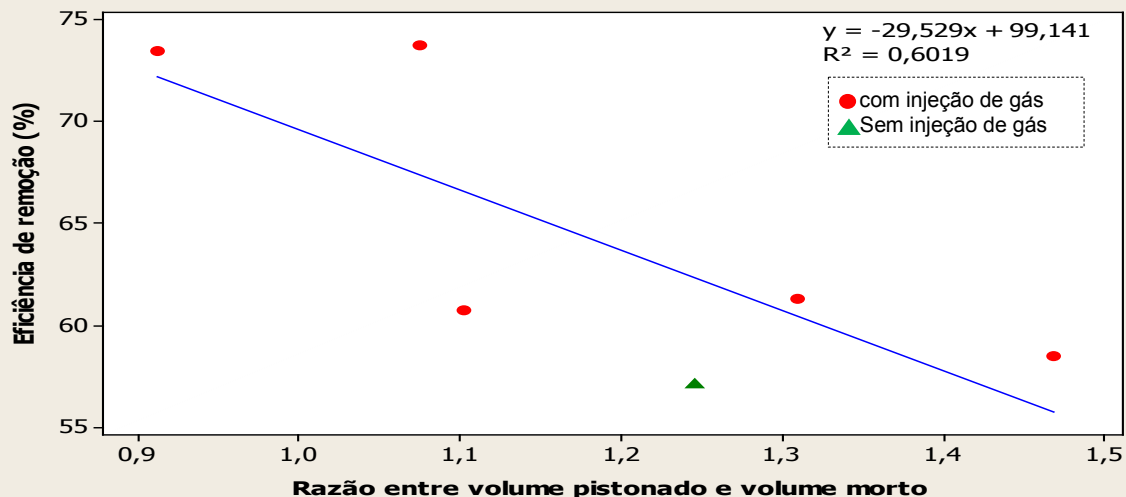


Figura 12. Correlação entre a eficiência de remoção de partículas e a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m) para as vazões de 0, 1, 2, 3, 4 e 8NI/min e posição de plugue a 56cm da válvula longa do distribuidor com diques e barragens.

Esperava-se um coeficiente de inclinação positivo para a reta estabelecida entre as duas variáveis, entretanto na Figura 12 é exibido um comportamento inverso entre as variáveis. Assim, para a configuração estudada, somente as análises exclusivas dos volumes característicos desse distribuidor não são adequadas para indicar a melhor configuração interna objetivando a máxima eficiência de remoção de inclusões. Pereira [14], em sua tese de doutorado, também fez essa mesma constatação, onde afirmou que associar um maior índice de flotação de inclusões a uma maior fração de volume em escoamento pistonado com uma menor fração de volume morto não é sempre válida. Outro aspecto sobre a análise das curvas características é o fato dessa metodologia não levar em consideração a remoção de inclusões pelo efeito das bolhas da cortina de gás [13].

4 CONCLUSÃO

Pelo presente trabalho é possível concluir que:

- O uso de injeção de gás em distribuidor com diques e barragens apresenta ganho estatisticamente significativo na eficiência de remoção de inclusões em relação ao mesmo distribuidor sem injeção de gás;
- A eficiência de remoção de inclusões de 73,2% foi considerada a melhor para o distribuidor com diques e barragens, e plugues posicionados a 56cm de afastamento da válvula longa e operando com a vazão de 3NI/min;
- A modelagem de curvas de nível de isoeficiências da superfície de resposta, indica a existência de uma região central no distribuidor na qual a eficiência supera 75% de remoção de inclusões, entre as posições de plugue de 52 a 63cm de afastamento da válvula longa para uma janela de vazões entre 2,2 a 2,8NI/min;
- A análise exclusiva dos volumes característicos do distribuidor não é adequada para indicar a melhor configuração interna objetivando a máxima eficiência de remoção de inclusões, haja vista que apresentou correlação inversa à expectativa na literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, pelo apoio financeiro concedido ao projeto de número de processo TEC-PPM-0118-13, intitulado: “Modelagens Física e Matemática do Escoamento Multifásico em Reatores Metalúrgicos”;

Ao apoio da CAPES/PROEX ao Programa de Pós-Graduação PPGEM/UFMG;

Aos estudantes do Departamento de Engenharia Metalúrgica: Laura Oliveira Lamas, Lorena Campolina Milan Lucrécio, Daniel Andrade de Jesus, Augusto Luis Almeida Santos, Gabriel Novaes da Silva e Bernardo Martins Braga pela colaboração e entusiasmo no desenvolvimento dos experimentos;

Os autores ressaltam a participação dos Engenheiros Metalurgistas: Hiuller Castro Araújo, Leonardo José Silva de Oliveira e André Afonso Nascimento em inúmeras discussões e contribuições técnicas.

REFERÊNCIAS

- 1 Sinha AK, Sahai Y. Mathematical modeling of inclusion continuous casting tundishes transport and removal. ISIJ International. 1993;33(5):556-566.
- 2 Nascimento RP. Remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido através do borbulhamento de argônio pelo fundo do distribuidor de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Tubarão [Dissertação, Mestrado]. Ouro Preto: Escola de Engenharia da UFOP; 2008. p. 17; 55-69.
- 3 Morales RD, Banderas AR, Demedices LG, Cruz MD. Mathematical simulation and modeling of steel flow with gas bubbling in trough type tundishes. ISIJ International. 2003;43(5):653-662.
- 4 Rogler JP. Modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling [Dissertação de Mestrado]. Toronto: Ryerson University; 2004. p. 57; 65.
- 5 Seshadri V, Tavares RP, Silva CA, Silva IA. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2012;9:22-29.
- 6 Zhang MJ, Gu HZ, Huang A, Zhu HX, Deng CJ. Physical and mathematical modeling of inclusion removal with gas bottom-blowing in continuous casting tundish. Journal of Mining and Metallurgy. 2011;47:37-44.
- 7 Sahai Y, Emi T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. ISIJ International. 1996;36(6):667-672.
- 8 Wollmann AM. Estudo de fluxo em um distribuidor de lingotamento contínuo [Dissertação de Mestrado]. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS; 1999. p. 8-29.
- 9 Chakraborty A. Development of an on-line aqueous particle sensor to study the performance of inclusions in a 12 tonne, delta shaped full scale water model tundish [Dissertação de Mestrado]. Montreal: McGill University; 2010.
- 10 Guthrie RIL, Li M. In situ detection of inclusions in liquid metals: Part I. Mathematical modeling of the behavior of particles traversing the electric sensing zone. Metallurgical and Materials Transactions B. Dec 2001;32B:1067.
- 11 Guthrie RIL, Li M. In situ detection of inclusions in liquid metals: Part II. Metallurgical applications of LIMCA systems. Metallurgical and Materials Transactions B. Dec 2001;32B:1081.
- 12 Sahai Y, Emi T. Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes. ISIJ International. 1996;36(9):1166-1173.
- 13 Machado FD. Modelagem física de remoção de inclusões em distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos [Dissertação de Mestrado]. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS; 2014. p. 21-36.
- 14 Pereira ROS. Modelamento matemático do escoamento turbulento, da transferência de calor e da solidificação no distribuidor e na máquina de lingotamento contínuo [Tese de Doutorado]. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG; 2004. p. 220.