

INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE AGITAÇÃO DO BANHO SOBRE A REMOÇÃO DE HIDROGÊNIO DURANTE ETAPA DE DESGASEIFICAÇÃO¹

André Masi Celiberto ²
Valmor Carnino ²

Resumo

Na constante busca por melhoria ao atendimento dos prazos dos clientes e redução dos custos produtivos, muitas vezes, a inserção de uma operação de tratamento térmico para difusão do hidrogênio na estrutura do material sólido representa uma etapa onerosa no roteiro de fabricação do aço. Tanto que, todas as usinas capacitadas com instalações de desgaseificação buscam atender os níveis de hidrogênio adequados aos seus produtos na etapa imediatamente anterior ao lingotamento. Dentro desse enfoque, foi realizado um trabalho para melhoria do processo de desgaseificação do aço de forma a atender as especificações dos produtos na aciaria da Gerdau Aços Especiais Piratini (AEP), equipada com uma estação de desgaseificação do tipo VD/VOD (Vacuum Degassing/Vacuum Oxygen Decarburizing). Como parte desse processo de melhoria, foi avaliada a influência de duas variáveis específicas no processo de desgaseificação sobre a remoção do hidrogênio do banho líquido através de um indicador baseado em medidas do nível de hidrogênio, antes e após o processo de desgaseificação. As variáveis foram determinadas com base em diferentes configurações dos plugs utilizados no fundo da panela para a rinsagem de gás, sendo elas: diferentes tipos de plugs de panela (tipo 1 e tipo 2) e diferentes posicionamentos de plugs na panela (plugs centrados e descentrados na panela). Os resultados demonstram que as panelas com plugs do tipo 2 e posicionados no centro das panelas propiciaram uma maior remoção de hidrogênio comparativamente as outras três configurações possíveis, sendo uma questão importante para a definição das práticas operacionais para melhoria do processo de desgaseificação.

Palavras-chave: Aço; Desgaseificação; Hidrogênio.

INFLUENCE OF STIRRING METHOD ON HYDROGEN REMOVAL DURING VACUUM DEGASSING

Abstract

In a constant effort to improve the lead-time and production costs in a global market, an operation of heat treatment for hydrogen diffusion in the billets or rolled bars represents a costly operation in the production route. And, because of that, steelmaking plants equipped with degassing facilities try to achieve a low hydrogen level just before casting to assure center soundness according to internal specifications and procedures. Based on that, it was conducted a project to improve the degassing process and achieve the internal specifications at Gerdau Aços Especiais Piratini (AEP), a specialty steelmaking plant equipped with a degassing facility of the type VD/VOD (Vacuum Degassing/Vacuum Oxygen Decarburizing). As a part of this project, it was evaluated the influence of the stirring method on hydrogen removal during the degassing process based on an indicator representing the hydrogen removal just before and after the degassing process. Using the structure of a design of experiments (DOE), two variables related to the porous plugs at the bottom of the ladle were chosen to evaluate this influence with different settings: different type of plugs (type 1 versus type 2) and different positions at the bottom of the ladle (in the center and out of the center). Results showed that plugs of the type 2 and located in the center of the ladle were better than other settings regarding hydrogen removal during the degassing process. Therefore, plug type and position are important factors to consider when searching for the best practices for the degassing operation.

Key words: Steel; Vacuum degassing; Hydrogen.

¹ Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² Gerdau Aços Especiais Piratini (AEP).

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais etapas na produção de aços especiais numa aciaria elétrica consiste no controle e remoção dos gases dissolvidos no banho, principalmente, o hidrogênio.

A remoção do hidrogênio somente pode ser obtida de forma eficiente através da etapa de desgaseificação a vácuo a valores inferiores a 2ppm no banho líquido, assim, garantindo a qualidade do produto a ser lingotado na etapa posterior.

Quando em níveis superiores, o hidrogênio pode afetar diretamente a sanidade interna de produtos de lingotamento após a solidificação, gerando a ocorrência de descontinuidades internas detectadas (flocos e/ou trincas internas) através de ensaios não destrutivos, como, por exemplo, o ultra-som. ⁽¹⁾

Não sendo possível a sua remoção do banho líquido durante a desgaseificação e, estando o hidrogênio em níveis elevados, são realizadas operações de tratamentos térmicos antes de se processar a deformação do material, buscando a difusão do hidrogênio na matriz sólida. No entanto, trata-se de uma operação bastante onerosa em termos de tempos e custos envolvidos, podendo inviabilizar o processamento industrial do material.

Em vista do exposto, a Gerdau Aços Especiais Piratini (AEP) direcionou seus trabalhos para a redução dos níveis de hidrogênio em sua aciaria elétrica equipada com uma estação de desgaseificação do tipo Vacuum Degassing/Vacuum Oxygen Decarburizing (VD/VOD), através de uma série de atividades para maior entendimento do processo e de suas variáveis correlatas. Dentre estas atividades, destacamos a realização de um experimento direcionado a determinar o impacto dos *plugs* utilizados no fundo da panela na rinsagem de gás, através da avaliação de diferentes tipos de *plugs* de panela (tipo 1 e tipo 2) e diferentes posicionamentos de *plugs* na panela (*plugs* centrados e descentrados na panela).

Para isso, medidas de hidrogênio justamente antes e após a etapa de desgaseificação foram realizadas com um sensor HYDRIS. Assim, um indicador do índice de remoção de hidrogênio foi determinado e correlacionado aos volumes de gás injetados durante o processo de desgaseificação para as quatro combinações possíveis no experimento.

Os resultados demonstram que as panelas com *plugs* do tipo 2 e posicionados no centro das panelas propiciaram uma maior remoção de hidrogênio comparativamente as outras três configurações possíveis, sendo uma questão importante para a definição das práticas operacionais para melhoria do processo de desgaseificação.

Fenômeno de Desgaseificação

De acordo com Deo e outros⁽²⁾, a cinética do processo de desgaseificação do hidrogênio pode ser estudada sobre três enfoques diferentes:

Caso 1: Desgaseificação durante a fervura (boiling), isto é, devido à evolução de monóxido de carbono pela reação de carbono e oxigênio dissolvidos no banho. As bolhas de monóxido de carbono representam sítios locais de baixa pressão parcial de hidrogênio para sua captação;

Caso 2: Desgaseificação durante a rinsagem de argônio/nitrogênio. As bolhas de argônio/nitrogênio representam sítios locais de baixa pressão parcial de hidrogênio para sua captação;

Caso 3: Desgaseificação sob vácuo. A própria atmosfera ambiente apresenta uma baixa pressão parcial de hidrogênio, propiciando sua remoção sob vácuo.

Tanto nos Casos 1 e 2, o processo de remoção do hidrogênio está intimamente baseado na ascensão de bolhas de gases (monóxido de carbono e/ou argônio e/ou nitrogênio), representando sítios de baixa pressão parcial para sua captação.

Bannenberg e outros⁽³⁾, em estudos conduzidos numa panela durante a desgaseificação, propôs o seguinte modelo para ilustrar o fenômeno de remoção de nitrogênio do banho e que poderia ser estendido também a remoção do hidrogênio: no fundo da panela, a pressão parcial de hidrogênio nas bolhas de gás injetado é aproximadamente zero (Figura 1). À medida que sobe, a bolha irá captar o hidrogênio, de acordo com a Lei de Sievert, até que a pressão parcial da bolha esteja em equilíbrio com o gás dissolvido no banho. No entanto, é logo abaixo da superfície do banho que, sendo menor a pressão ferroestática, haverá a expansão da bolha de gás, captando mais hidrogênio do banho para sua remoção.

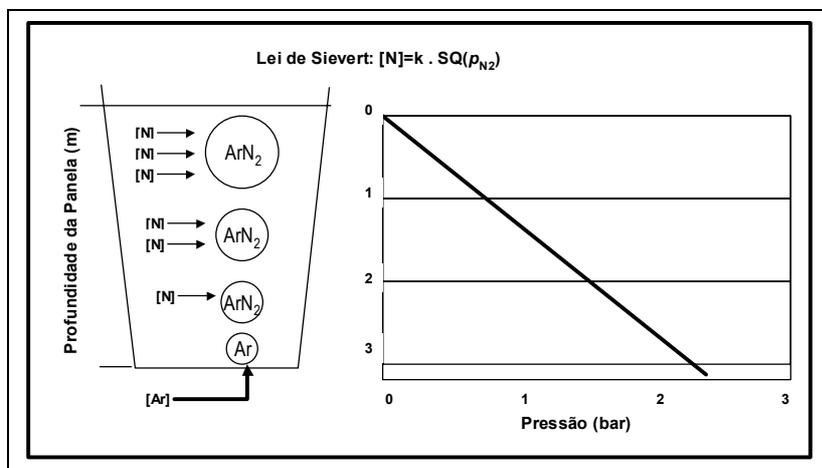


Figura 1. Representação esquemática da retirada de nitrogênio do banho pelo argônio e a pressão local durante a etapa de desgaseificação. De acordo com Bannenberg e outros⁽³⁾, este mesmo modelo pode explicitar o fenômeno de remoção de hidrogênio do banho.

Influência das Variáveis de Processamento

Entre as principais variáveis estudadas na literatura durante o processamento em instalações do tipo VD, destacam-se as seguintes:^(3, 5-8)

- Influência da pressão do tanque atingida durante o processo;^(3, 5, 6)
- Influência do tempo de desgaseificação sob baixa pressão;^(3, 5, 6)
- Influência do volume total de gás injetado quando em baixa pressão;^(3, 5, 6)
- Influência do método de agitação do banho.^(3, 7, 8)

Como regra geral, os parâmetros de processo de diversos equipamentos industriais são especificados com base na pressão atingida e o tempo de processo, partindo do pressuposto que as vazões são constantes. No entanto, na prática industrial, nem sempre pode-se garantir a constância dos volumes injetados devido a uma série de condições operacionais e de processo, principalmente, quando ocorre o fenômeno de espumação de escória que, por vezes, pode se traduzir na parada do processo.

Determinação do Índice de Remoção de Hidrogênio

Turkdogan⁽⁴⁾ define a taxa de remoção de hidrogênio do banho durante a desgaseificação como um processo de transferência de massa no aço líquido

definido pela seguinte equação cinética de primeira ordem:

$$\ln\left(\frac{[H]_f - [H]_e}{[H]_i - [H]_e}\right) = -k_h \cdot t \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

[H]_f = concentração de hidrogênio após desgaseificação em ppm;

[H]_i = concentração de hidrogênio inicial em ppm;

[H]_e = concentração de hidrogênio em equilíbrio determinado pela pressão do sistema em ppm;

t = tempo de desgaseificação sob baixa pressão;

k_h = constante de remoção de hidrogênio em *t*⁻¹.

Assumindo que na maioria dos equipamentos industriais as pressões alcançadas estão abaixo de 0,01 atm (10 torr), o componente [H]_e pode ser desprezado.

Porém, alguns autores utilizam uma forma mais simplificada para determinar um índice de remoção de hidrogênio durante a desgaseificação ⁽³⁾:

$$\Delta[H] = \frac{[H]_i - [H]_f}{[H]_i} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

Δ[H] = variação na concentração de hidrogênio durante a desgaseificação em %.

[H]_f = concentração de hidrogênio após desgaseificação em ppm;

[H]_i = concentração de hidrogênio inicial em ppm.

2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Descrição da Planta

A Gerdau Aços Especiais Piratini (AEP) é uma das plantas pertencentes ao Grupo Gerdau e direcionada a produção de aços especiais na forma de fio-máquina, barras laminadas e/ou forjadas de seções redondas e quadradas, principalmente focada em atender as especificações da indústria automobilística.

A aciaria é composta de um forno elétrico a arco (FEA), uma estação de forno panela (FP) do tipo ASEA-SKF, uma estação de desgaseificação do tipo VD/VOD e uma máquina de lingotamento contínuo (LC) de 3 veios com seções quadradas de 150, 180 e 240mm e, também, uma estação de lingotamento convencional (LCV), principalmente para aços ferramenta.

A estação de desgaseificação do tipo VD/VOD é de fornecimento/projeto Mannesmann-Demag e composta de tanque para painéis de aproximadamente 65t com uma borda livre típica de 0,70m, porém, muitas vezes, operando com até 0,50m. O sistema supervisório sofreu uma atualização em 2003, inclusive, com a implementação de um programa e uma sonda para o controle da composição dos gases de saída do tanque (*off-gas*). Esse programa, denominado *Multi Task Analyser* (MTA), permite o controle de todas as variáveis *on-line* (tempo, pressão, volumes de gases injetados, composição dos gases de saída,...) e a rastreabilidade dos dados de todas as corridas produzidas.

Características da Estação de Desgaseificação VD	
	<p>Silo Adição de Ligas</p> <p>Lança Sopros Oxigênio</p> <p>Tampa Superior</p> <p>Tubulação Sucção Gases</p> <p>Placa</p>
Fornecedor	Mannesmann Demag
Sistemas Principais	01 Sistema de Vácuo
	01 Sistema de Selagem de Tampa
	02 Tanques de Vácuo (win)
	02 Sistemas de Agitação
	01 Sistema de Adição de Ligas
	01 Sistema de Sopros de Oxigênio (VOD)
Componentes principais	01 Sistema de Mangas para Filtragem Resíduos Sólidos
	04 ejetores
	02 condensadores com jatos d'água
	01 bomba de vácuo (5000 m ³ /h)
Capacidade	65t
Borda livre típica	0,70 m
Perdas Térmicas	2,5 a 3,5°C/min

Figura 2. Características da estação de desgaseificação do tipo VD/VOD.

No caso das corridas que não atendem as especificações internas de hidrogênio, os tarugos são direcionados para fornos de tratamento térmico numa etapa posterior ao lingotamento para a realização de tratamento de difusão de hidrogênio.

Planejamento de Experimentos

Um planejamento de experimentos (DOE) foi realizado como forma de se avaliar o impacto de diferentes configurações de posicionamento e tipo de plugs no índice de remoção de hidrogênio (conforme Eq. 2) durante a etapa de desgaseificação.

A análise estatística do planejamento de experimentos (DOE) permite avaliar quais as variáveis ou mesmo a interação delas que apresentam o maior impacto sobre a variável de resposta do experimento, no caso, o índice de remoção.

Como a remoção de hidrogênio é um processo cinético de transferência de massa envolvendo baixas pressões, estabelecemos que os experimentos seriam válidos para as corridas que atingissem pressões de vácuo menores ou iguais a 10mbar e que todo o volume de gás injetado abaixo dessa pressão seria contabilizado e correlacionado com os índices de remoção.

Assim, o planejamento de experimentos (DOE) foi rodado com base num fatorial do tipo 2 na 2 envolvendo as variáveis a seguir, em dois níveis cada: posicionamento do plug na placa (centrado x descentrado) e tipo de plug (1 x 2), envolvendo no mínimo 10 corridas de avaliação para cada condição do experimento.

Tabela 1. Estrutura do planejamento de experimentos com as combinações possíveis de variáveis.

Experimento	Variável do Experimento		Variável de Resposta
	Posição do Plug	Tipo de Plug	Índice de Remoção (%)
1	Descentrado	1	$\Delta H_1=f(p, Vol)$
2	Centrado	1	$\Delta H_2=f(p, Vol)$
3	Descentrado	2	$\Delta H_3=f(p, Vol)$
4	Centrado	2	$\Delta H_4=f(p, Vol)$

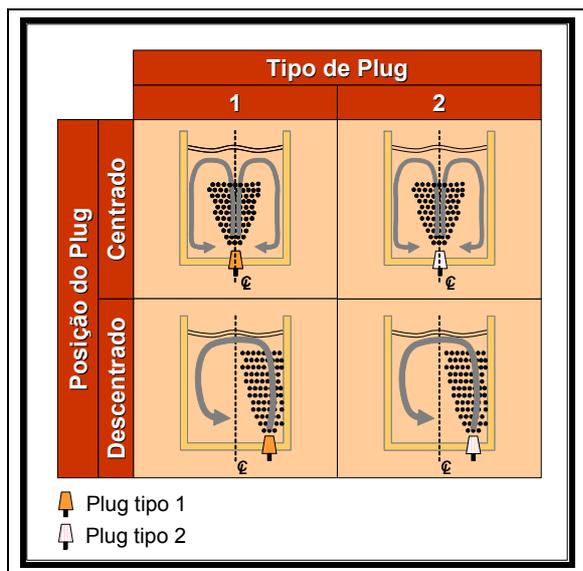


Figura 3. Esquema ilustrativo das quatro condições rodadas dentro do planejamento de experimento (DOE).

Tanto o posicionamento como o tipo de plug empregado devem apresentar certa influência na formação da pluma na panela e, conseqüentemente, na abertura do denominado “olho” sobre a superfície do banho, acarretando uma maior ou menor exposição do banho para a remoção do hidrogênio.

Tabela 2. Detalhamento do planejamento na forma de um plano resumido 5W1H para avaliação do impacto de diferentes configurações de posição e tipo de plug sobre o índice de remoção de hidrogênio.

O QUE	QUEM	ONDE	COMO	POR QUÊ
<p>Determinar o impacto de diferentes posições e tipos de <i>plug</i> no índice de remoção de hidrogênio durante a etapa de degaseificação.</p> <p>As variáveis em análise são: - posição do plug na panela; - tipo de plug na panela. Para cada variável, avaliar 2 níveis possíveis: - posição: centrado x descentrado; - tipo: 1 x 2.</p> <p>Condições dos experimentos: . Tempo de degaseificação variando de 10 a 20min; . Pressão de vácuo inferior a 10mbar. . Volumes de gás (Ar/N₂) injetados variando de 0 a 2000NL por corrida quando pressão inferior a 10mbar.</p>	Equipe de Processo	Estação de Degaseificação (VD)	<p>. Medição do nível de hidrogênio, via HYDRIS, antes e após degaseificação (abertura da tampa);</p> <p>. Amostragem: mínimo 10 corridas para cada condição;</p> <p>. Medição do volume de gás injetado (Ar/N₂) quando a pressão do tanque é menor do que 10mbar;</p> <p>. Calcular o índice de remoção (conforme Eq. 2) para cada corrida e correlacionar com o volume de gás injetado, obtendo quatro curvas correspondentes a cada condição.</p> <p>. Determinar o índice de remoção para um mesmo volume de gás injetado nas quatro condições.</p> <p>. Rodar o planejamento de experimentos utilizando o software MINITAB de modo a determinar a variável ou combinação de variáveis mais influente no índice de remoção de hidrogênio.</p>	<p>. Determinar influência de diferentes configurações de posição e tipo de <i>plug</i> sobre o índice de remoção de hidrogênio.</p>

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Influência do Volume de Gás Injetado

Uma vez que é ressaltado a importância dos volumes de gás injetados durante a desgaseificação dos aços (3, 5), buscou-se correlacionar os índices de remoção obtidos com os volumes de gás injetados quando a pressão é inferior a 10mbar. Como veremos adiante, o índice de remoção de hidrogênio foi calculado em relação a um determinado índice base de referência definido nesse trabalho de modo a propiciar uma comparação das quatro curvas mais adiante. O resultado é apresentado na Figura 4:

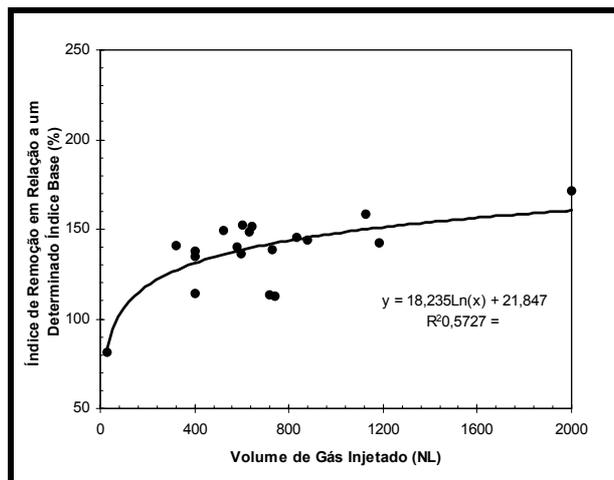


Figura 4. Influência do volume de gás injetado (Ar/N₂) quando em pressões inferiores a 10mbar sobre o índice de remoção de hidrogênio, apresentando uma regressão logarítmica simples para o experimento 3.

Observa-se que o índice de remoção cresce rapidamente para volumes de gás injetados de até 500NL, quando se alcança índices de remoção da ordem de 200% (em relação ao menor valor obtido nesse experimento). A partir deste ponto, o índice de remoção cresce, mas em menor intensidade.

Os resultados obtidos são comparáveis aos obtidos por Bannenberg et al. (3) em estudo abrangendo um desgaseificador a vácuo do tipo VD de 185t. Porém, com uma ressalva ao estudo de Bannenberg et al. que consideram as vazões constantes ao longo do processo estudado, assim, passando a correlacionar o tempo de desgaseificação a baixo vácuo com os índices de remoção.

Os resultados obtidos nessa correlação demonstram a importância dessa variável na desgaseificação.

3.2 Determinação das Variáveis Significativas do Experimento

Para cada uma das condições, determinou-se a correlação existente entre volume de gás injetado quando a pressão era inferior a 10mbar e os índices de remoção relativos.

A correlação entre essas variáveis pode ser expressa através de uma relação do tipo logarítmica em todos os casos, obtendo-se coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,53, com exceção da configuração 2 que apresentou R^2 de 0,39.

Os resultados para cada condição serão apresentados a seguir, sendo que os índices de remoção foram calculados com relação a um índice utilizado como base

de referência para as 4 configurações.

Os resultados obtidos foram condensados na Figura 5 com base nas equações de regressão determinadas para cada configuração.

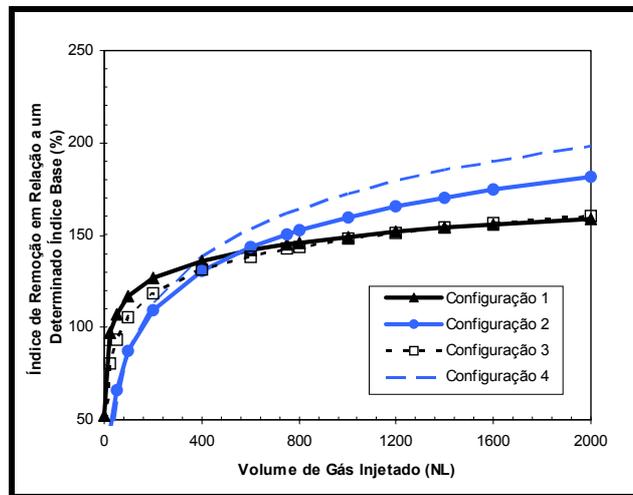


Figura 5. Influência dos volumes de gás injetados com base nas equações de regressão para cada uma das configurações rodadas através do DOE fatorial 2 na 2.

A análise do gráfico permite observar que existe uma tendência a maiores índices de remoção com a configuração 4, seguida da 2, para volumes de gás injetados superiores a aproximadamente 500NL. Já no caso das condições 1 e 3, onde tem-se o plug descentrado na panela, os índices de remoção de hidrogênio se assemelham para quaisquer volume de gás injetados.

Assim, dando continuidade ao experimento, foi fixado um volume de gás injetado de 750NL e calculado os respectivos índices de remoção com base nas equações de regressão para rodar o DOE através do aplicativo estatístico MINITAB Release 13.

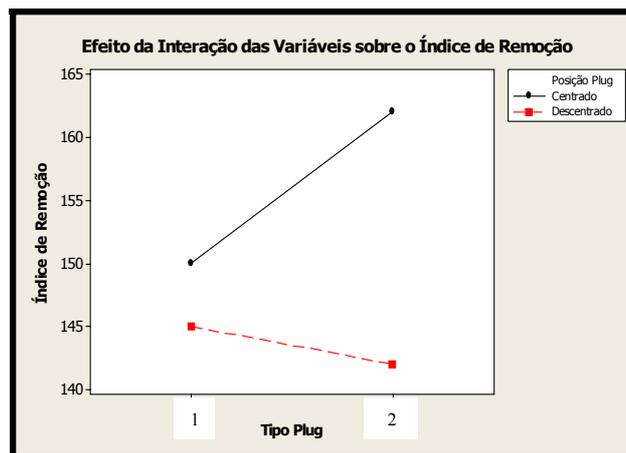


Figura 6. Gráfico de interação das variáveis do experimento fatorial 2 na 2 para o índice de remoção de hidrogênio.

A análise do gráfico demonstra que os resultados do índice de remoção de hidrogênio para a condição de plug centrado na panela estão num nível mais elevado, independentemente do tipo de plug. Para a posição de plug descentrado na panela, independentemente do tipo, o índice de remoção de hidrogênio se mantém na faixa de 140 a 145% do valor base. No entanto, quando o plug está na condição

centrada e é do tipo 2, tem-se o melhor resultado, com 162% de índice de remoção do valor base.

4 CONCLUSÃO

A condução de um experimento direcionado através da metodologia DOE num fatorial 2 na 2 para avaliação da influência do tipo e posição do plug na panela permitiu evidenciar que a posição do plug na panela é uma variável significativa, principalmente para volumes de gás injetados superiores a 500NL.

Estando o plug na posição centrada e do tipo 2, tem-se o melhor resultado do experimento, com 162% de índice de remoção frente a um determinado índice base estipulado como referência para o experimento.

Como investigações futuras, pode-se trabalhar ou no refinamento das regressões lineares baseadas nas variáveis mais significativas do processo ou no desenvolvimento de modelos físicos para o estudo de impacto dos métodos de injeção de gás no banho, com sua influência sobre a formação da pluma, abertura do denominado “olho”, agitação no interior do banho, entre outros.

REFERÊNCIAS

- 1 FRUEHAN, R. J. A review of hydrogen flaking and its prevention. **Iron and Steel Maker**, ago. 1997, p. 61–69.
- 2 DEO, B.; BOOM, R. **Fundamentals of Steelmaking Metallurgy**. [s/l], 1993, p. 246-252.
- 3 BANNENBERG, N.; BERGMANN, B.; WAGNER, H.; GAYE, H. Combined decrease of sulphur, nitrogen, hydrogen and total oxygen in only one secondary steelmaking operation. In: **Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress**. Nagoya: Japão, 1990; p. 603-610.
- 4 TURKDOGAN, E. T. **Fundamentals of Steelmaking**. Londres: The Institute of Materials, 1996. 331p.
- 5 FRUEHAN, R. J. **The Making, Shaping and Treatment of Steel – Steel Making and Refining Volume**. EUA: AISE Steel Foundation - Association of Iron and Steel Engineers, 11a Ed., 1998, p. 661-713.
- 6 FRUEHAN, R. J. Vacuum Degassing of Steel. [s/l]: **Iron and Steel Society – AIME**, 1990, 193p.
- 7 JAUHAINEN, A.; JONSSON, L.; JONSSON, P.; ERIKSSON, S. The Influence of Stirring Method on Hydrogen Removal During Ladle Treatment. **Steel Reserch**, nº 3, 2002, p. 82-90.
- 8 HALLBERG, M.; JONSSON, L.; ALEXIS, J. Modelling of the Hydrogen and Sulphur Refining During Vacuum Degassing in a Ladle Furnace. In: **Scanmet I**, Lulea-Suécia, Jun. 1999, 52 p.