

INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO DE PLUGUES SOBRE REMOÇÃO DO HIDROGÊNIO DURANTE DESGASEIFICAÇÃO¹

*André Masi Celiberto²
Frederico da Silva Machado Júnior³
Rodrigo Belloc Soares⁴
Rafael Skrzek Sicorski⁵
Leonardo Barboza Trindade⁶
Antônio Cezar Faria Vilela⁷*

Resumo

Na constante busca por melhorias no processo, as aciarias equipadas com desgaseificadores necessitam implementar as melhores práticas para redução dos níveis de hidrogênio antes de lingotar. Dessa forma, dando continuidade aos projetos para melhorias de processo, foi avaliado o impacto de diferentes posicionamentos de plugues utilizados no fundo da panela para a rinsagem de gás durante a desgaseificação. Experimentos foram realizados na aciaria da Gerdau Aços Especiais Piratini, equipada com um tanque VD/VOD. A análise foi feita baseada em medidas do nível de hidrogênio antes e após a desgaseificação. Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo matemático para melhor compreensão do fenômeno e sua respectiva validação com base nos dados obtidos na planta, de tal forma a disponibilizar uma ferramenta adicional para novas avaliações. Os testes demonstraram que o plugue na posição central apresenta maiores índices de remoção de hidrogênio em comparação ao plugue descentrado para a configuração específica de panela sob estudo. Também, foi verificado que o modelo matemático apresenta boa concordância com os dados obtidos em termos de remoção de hidrogênio para o plugue na posição central.

Palavras-chaves: Aço; Desgaseificação; Modelo matemático.

INFLUENCE OF DIFFERENT PLUG POSITIONS IN THE HYDROGEN REMOVAL DURING DEGASSING

Abstract

In a constant effort to achieve improvements in the process, steelmaking plants equipped with degassers need to implement the best operational practices for reducing the hydrogen levels before casting. Based on that, in a project of continuous improvement at Gerdau Aços Especiais Piratini, equipped with a tank degasser VD/VOD, it was evaluated the influence of different plug positions at the bottom of the ladle during the degassing process aiming at determining the one that improves the hydrogen removal, based on measurements before and after degassing. Additionally, it was also developed a mathematical model for a better understanding of the process and its validation comparing measurements in the plant. Results demonstrate better hydrogen removal with the centered plug. Also, the mathematical model showed good agreement with measurements in the plant for the centered plug.

Key words: Steel; Degassing; Mathematical model.

¹ Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, M.Sc. – Eng. de Processo Aciaria Gerdau Aços Especiais Piratini

³ Engenheiro Metalúrgico – Chefe Forno Panela Aciaria Gerdau Aços Especiais Piratini

⁴ Engenheiro Metalúrgico, M.Sc. – Gerente Industrial Gerdau Aços Especiais Piratini

⁵ Engenheiro Mecânico, Mestre em Eng. Metalúrgica - Science Technology & Engineering – STE

⁶ Físico, Dr. Eng. Metalúrgica - Diretor Geral - Science Technology & Engineering – STE

⁷ Engenheiro Metalúrgico, Dr.-Ing., Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS, Coordenador do LASID

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.

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; porém, trata-se de uma operação bastante onerosa em termos de custos e tempos envolvidos.

Seguindo o processo de melhoria contínua, a Gerdau Aços Especiais Piratini buscou dar continuidade a seus trabalhos de melhoria da desgaseificação ⁽¹⁾ em sua aciaria equipada com um desgaseificador a vácuo do tipo *Vacuum Degassing/Vacuum Oxygen Decarburizing (VD/VOD)*. Desta vez, buscando avaliar na prática industrial o impacto de diferentes posicionamentos de plugues utilizados no fundo da panela para a rinsagem de gás durante o processo de desgaseificação e, adicionalmente, o desenvolvimento de um modelo matemático para o processo capaz de validar os resultados obtidos em planta.

Assim, na planta, foram realizados experimentos práticos com 2 configurações com o intuito de se determinar a configuração que propiciaria a maior remoção de hidrogênio do banho tendo como base a avaliação de um indicador relacionado a medidas do nível de hidrogênio, antes e após o processo de desgaseificação, via sensor HYDRIS.

FENÔMENO DA DESGASEIFICAÇÃO

De acordo com Deo et al.,⁽²⁾ a cinética do processo de desgaseificação do hidrogênio pode ser estudada sobre três enfoques diferentes (Tabela 1):

Tabela 1: Fenômenos atrelados ao processo de desgaseificação conforme Deo et al.⁽²⁾.

Caso 1	Caso 2	Caso 3
Desgaseificação durante a fervura (<i>boiling</i>)	Desgaseificação durante a rinsagem de argônio/nitrogênio	Desgaseificação sob vácuo
Devido a 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.	As bolhas de argônio/nitrogênio também representam sítios locais de baixa pressão parcial de hidrogênio para sua captação.	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 gás (monóxido de carbono e/ou argônio e/ou nitrogênio), representando sítios de baixa pressão parcial para sua captação.

Bannenberget al.,⁽³⁾ em estudos conduzidos numa panela durante a desgaseificação, propôs um modelo para ilustrar o fenômeno de remoção de nitrogênio do banho e que poderia ser estendido também ao 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 maior quantidade de hidrogênio para sua remoção.

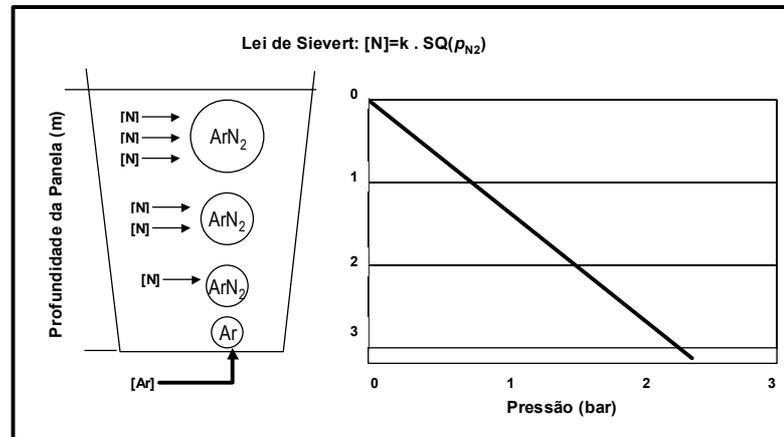


Figura 1: Representação esquemática da retirada de nitrogênio do banho pelo argônio e a pressão local durante a etapa de desgaseificação. De acordo com Bannenberg et al.,⁽³⁾ este mesmo modelo pode explicitar o fenômeno de remoção de hidrogênio do banho.

Entre as principais variáveis estudadas na literatura durante o processamento em instalações do tipo VD, destacam-se as seguintes:

- 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 em baixa pressão^(1, 3, 5, 6);
- Influência do método de agitação do banho^(1, 3, 7, 8).

Neste trabalho, será dado ênfase a análise da influência do método de agitação.

INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE AGITAÇÃO

Jauhiainen et al.⁽⁷⁾ estudaram o efeito de diferentes métodos de agitação do banho sobre os níveis finais de hidrogênio num desgaseificador do tipo ASEA-SKF. Para tanto, utilizaram um modelo matemático desenvolvido com base nas equações de transporte de massa para a desgaseificação a vácuo que apresentou uma correlação satisfatória com medições realizadas na planta da Ovako Steel em estudos anteriores⁽⁸⁾ – mais tarde, também sendo aplicado no desgaseificador a vácuo do tipo ASEA-SKF de 190t da SSAB Oxelösund, Suécia.

O modelo foi utilizado para prever os níveis de hidrogênio finais após a desgaseificação de 10min de um aço microligado sob o efeito de 4 modos diferentes de agitação do banho, envolvendo a aplicação de agitação eletromagnética do banho com fluxo ascendente ou descendente de aço e aplicação de 1 ou 2 plugues para rinsagem.

As simulações demonstraram que o menor nível de hidrogênio atingido foi utilizando a agitação combinada via plugue poroso e eletromagnética no sentido descendente. O melhor desempenho foi atribuído a um maior tempo de permanência da bolha de argônio no interior do banho, acarretado pela maior turbulência provocada no fundo da peneira devido ao choque entre o fluxo descendente de aço pela agitação eletromagnética e o fluxo ascendente de aço pela injeção de gás via plugue poroso.

Hallberg et al. ⁽⁸⁾ também estudaram o efeito de diferentes métodos de agitação na desgaseificação de aços rolamento em uma aciaria, não encontrando uma diferença significativa entre as taxas de remoção para métodos baseados ou na agitação combinada ou somente na agitação via plugue poroso. Porém, foi observado que no caso da agitação exclusivamente via plugue poroso, o posicionamento dos plugues na panela seria uma variável a ser considerada de importância na remoção do hidrogênio.

Celiberto et al. ⁽¹⁾ também constatou, através de medidas realizadas em planta, a influência de diferentes tipos e posicionamentos de plugues sobre o processo de remoção de hidrogênio, obtendo resultados satisfatórios com um tipo de plugue específico situado no centro da panela.

MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

Físico-química da Desgaseificação

A remoção do hidrogênio dissolvido no banho acontece, basicamente, em três etapas: transferência de massa no banho, reação química na superfície das bolhas, através da reação descrita pela Equação 1, e pela transferência de massa nas bolhas de gás. ⁽⁶⁾



Alguns estudos simplificam essas etapas, reduzindo-as a principal que é a transferência de massa (hidrogênio) no banho.

A Lei de Sievert ^(3,5) estabelece que na interface banho-gás existe uma condição de equilíbrio dada pela razão entre a pressão parcial do gás e a concentração do hidrogênio dissolvido no banho demonstrada pela Equação 2.

$$\frac{P_{H_2}}{[wt\%H]_{metal}^2 f^2} = \exp\left(\frac{-\Delta G^0}{RT}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: f é o coeficiente de atividade, ΔG^0 é a energia livre de Gibbs para a reação, ^(4,5) R é a constante universal dos gases e T é a temperatura do banho.

Fluidodinâmica da Desgaseificação

Para determinar a transferência de massa do hidrogênio dissolvido durante o processo de vácuo, é necessário a solução das equações de escoamento aço-argônio, descritas pela Equação 3 e 4.

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{u}_l) = S_{massa} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l \bar{u}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{u}_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \alpha_l \rho_l g + \sum_1^2 K_{lg} (\bar{u}_g - \bar{u}_l) + F_l \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: K representa o coeficiente de transferência de *momentum* entre as fases metal líquido e gás e F_l as forças de não-arrasto (sustentação, turbulência e massa virtual). As equações para a fase gasosa podem ser obtidas a partir da

equação de fechamento de fração volumétrica $\alpha_l + \alpha_g = 1$ e trocando o sinal das forças de não-arrasto, de tal forma que $F_l = -F_g$.

A turbulência no sistema foi calculada através do modelo *k-epsilon* tradicional, que naturalmente envolve a solução de mais duas equações de transporte para o balanço de k e ε : a energia cinética de turbulência e a dissipação da mesma.

Transporte de Hidrogênio

O transporte de massa do hidrogênio dissolvido no banho é calculado a partir da Equação 5.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_\phi + \frac{\mu_t}{S_{ct}} \right) \frac{\partial (\phi / \rho)}{\partial x_j} \right] + S_\phi \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo: ϕ é a variável adicional concentração que representa o hidrogênio, D_ϕ a difusividade cinemática do hidrogênio no metal e S_{ct} o número de Schmidt turbulento. O termo fonte (S_ϕ) é onde se insere os parâmetros que controlam a reação de hidrogênio dissolvido e gasoso no banho.

Condições de Contorno e Procedimento Numérico

A injeção de gás se dá através de um termo fonte com vazão mássica correspondente a uma determinada vazão normal de argônio. Na parede da panela e no fundo é assumida uma condição de não-escorregamento para a fase metal líquido e de escorregamento para a fase gás. Na superfície do banho, é imposta uma condição de pressão prescrita de acordo com o valor de pressão to tanque de vácuo, sendo que o gás representa o único componente capaz de sair do domínio.

O valor inicial de hidrogênio dissolvido no banho é assumido homogêneo em todo o domínio. O hidrogênio dissolvido só é removido do sistema através do gás e da interface com a atmosfera.

O processamento numérico das equações descritas na formulação matemática foi feita mediante o uso do pacote comercial Ansys CFX 10.0, que emprega o método de volumes finitos baseado em elementos.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

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 (Figura 2) 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 panelas de 65t. O sistema supervisorio teve 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, vazões, volumes de gás injetado, composição do gás de saída,...) e a rastreabilidade dos dados de todas as corridas produzidas.

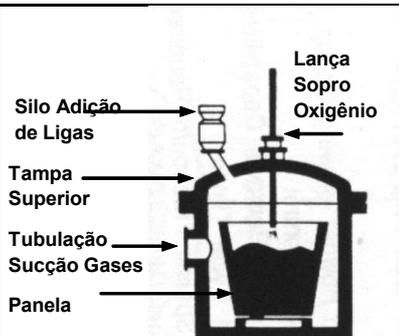
<p>Características da Estação de Desgaseificação VD</p>	
<p>Fornecedor</p>	<p>Mannesmann Demag</p>
<p>Sistemas Principais</p>	<p>01 Sistema de Vácuo 01 Sistema de Selagem de Tampa 02 Tanques de Vácuo (twin) 02 Sistemas de Agitação 01 Sistema de Adição de Ligas 01 Sistema de Sopros de Oxigênio (VOD) 01 Sistema de Mangas para Filtragem Resíduos Sólidos</p>
<p>Componentes principais</p>	<p>04 ejetores 02 condensadores com jatos d'água 01 bomba de vácuo (5000m³/h) bombas de água e de resfriamento</p>
<p>Capacidade</p>	<p>65t</p>
<p>Perdas Térmicas</p>	<p>2,5 a 3,5°C/min</p>

Figura 2: Características da estação de desgaseificação do tipo VD/VOD da Gerdau Aços Especiais Piratini.

Planejamento de Experimentos

Conforme mencionado, foi realizado um comparativo entre o desempenho de panelas utilizando um plugue centrado e outras com um plugue descentrado, que significa estar aproximadamente localizado a um terço do raio, contado a partir da parede da panela (Tabela II). Inclusive, vale ressaltar que os resultados deste estudo são referentes à geometria específica de panela da Aciaria da Gerdau Aços Especiais Piratini.

Para cada uma das corridas realizadas (mínimo 10 corridas para cada experimento), foram realizadas medidas do nível de hidrogênio imediatamente antes e após a desgaseificação com um sensor comercial HYDRIS.

Com esses valores, foi definido um índice de remoção de hidrogênio ($\Delta[H]$) para comparar as situações conforme Equação 6.

$$\Delta[H] = \frac{[H]_i - [H]_f}{[H]_i} \times 100\% \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

$[H]_f$ é a concentração de hidrogênio após a desgaseificação em ppm;

$[H]_i$ é a concentração inicial de hidrogênio em ppm;

$\Delta[H]$ é o índice de remoção de hidrogênio em %.

Esses valores foram correlacionados com os volumes de gás injetados quando em pressões inferiores a 10mbar durante a desgaseificação. Esse mesmo procedimento foi proposto por Bannenberg et al. ⁽³⁾ em seus estudos envolvendo a remoção de hidrogênio do banho.

Adicionalmente, com base em uma das medidas realizadas através do experimento 2, foi desenvolvido o modelo numérico, buscando sua validação.

Tabela 2: Experimentos realizados com diferentes posicionamentos do plugue.

	Variável do Experimento	Variável de Resposta
Experimento	Posição do plugue	Índice de Remoção (%)
1	Descentrado na Panela *	ΔH_1
2	Centrado na Panela	ΔH_2

Nota *: aproximadamente a um terço do raio, contado a partir da parede da panela.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada um dos experimentos, foi avaliada a correlação existente entre o volume de gás injetado e o índice de remoção através de um gráfico de dispersão, como apresentado na Figura 3. Também, através de uma regressão linear, foi determinado o tipo de correlação existente para as variáveis analisadas: índice de remoção e volume de gás injetado, conforme proposto por Bannenberg et al ⁽³⁾.

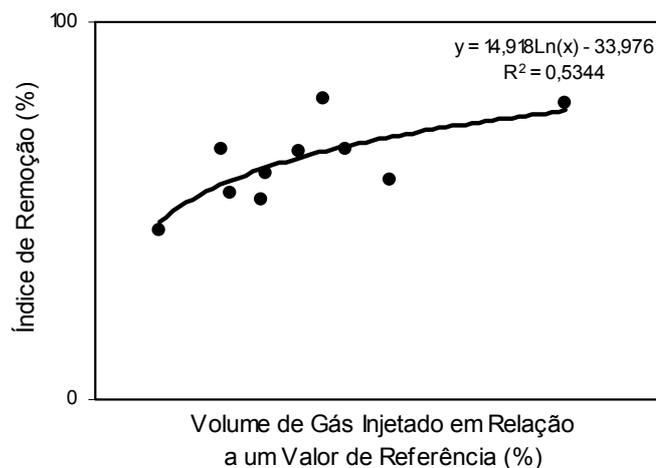


Figura 3: Influência do volume de gás injetado (Ar/N_2) quando em pressões inferiores a 10mbar sobre o índice de remoção de hidrogênio para Experimento 2.

A correlação entre essas variáveis pode ser expressa através de uma relação do tipo logarítmica, obtendo-se um valor de $R^2=0,53$ para o coeficiente de determinação, sendo considerado satisfatório neste momento por se tratar de condições industriais, sujeitas a diversos ruídos.

Para ambos os experimentos, foi determinada a reta de correlação existente para as variáveis e sumarizadas em um só gráfico (Figura 4), a partir do qual, observa-se que, para a condição de plugue centrado, há uma maior tendência a remoção de hidrogênio a partir de 500NL injetados, para um mesmo volume de gás, quando comparado com o plugue descentrado.

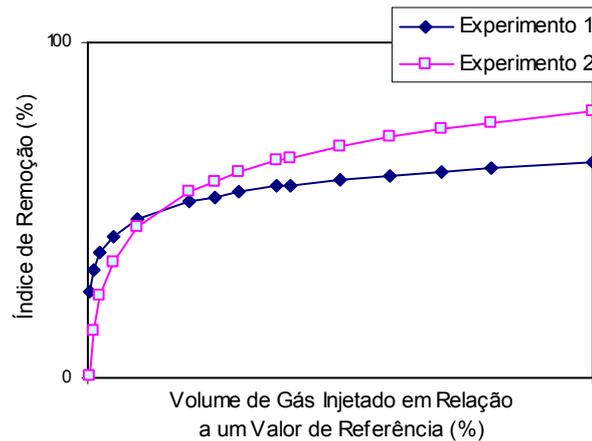


Figura 4: Influência do volume de gás injetado (Ar/N_2) quando em pressões inferiores a 10mbar sobre o índice de remoção de hidrogênio para Experimento 1 e 2 (regressão linear).

A partir deste ponto, o modelo numérico matemático foi comparado com dados experimentais para uma corrida, denominada de A, com plugue centrado, um determinado valor inicial de hidrogênio $[H]_i$, e condições de desgaseificação determinadas e estabelecidas (500NL quando pressão inferior a 10mbar).

O modelo permite visualizar um corte central da panela, bem na posição do plugue centrado, contendo o campo de vetores de velocidade e a pressão total na panela (Figura 5).

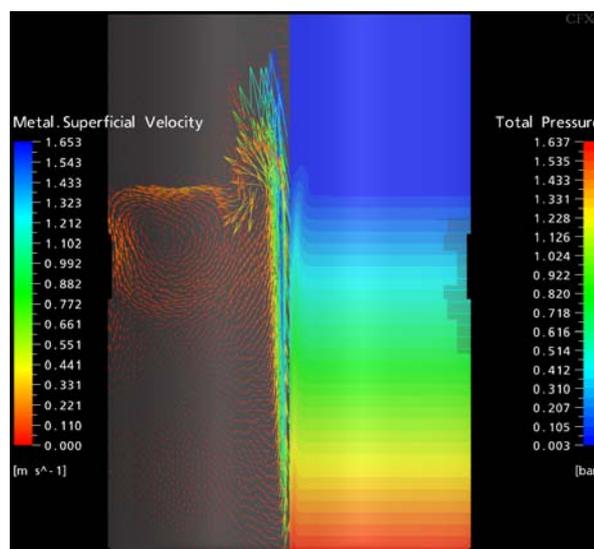


Figura 5: Campo de vetores de velocidade e distribuição de pressão total na panela para Experimento 2.

Observa-se que o aço ascende rapidamente pela região central devido às bolhas de gás injetadas pelo plugue central. Pode-se notar que a velocidade tende a aumentar, à medida que a pressão total diminui em decorrência da expansão das bolhas. Na superfície do banho a pressão é da ordem de 4mbar e, junto a região de ascensão das bolhas, onde o escoamento é mais intenso, observa-se um leve aumento da pressão total devido à contribuição da pressão dinâmica.

Também, é possível visualizar o mapa de concentração adimensional de hidrogênio dissolvido no metal (Figura 6).

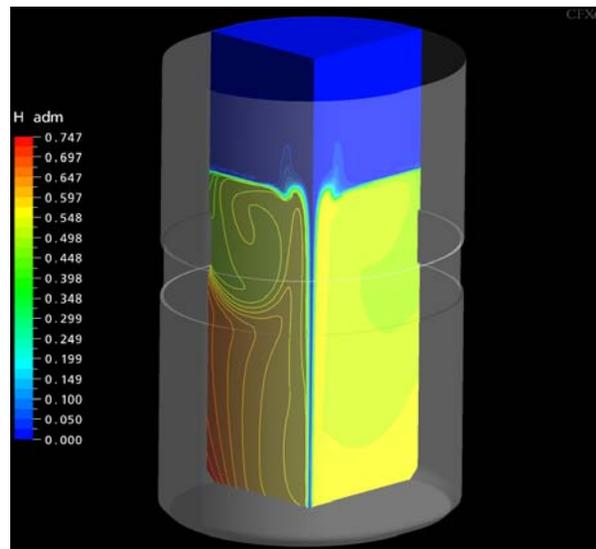


Figura 6: Valores relativos da concentração de hidrogênio após o vácuo.

A forma desta distribuição está muito relacionada ao escoamento gerado pela injeção de gás. As regiões de concentração mais baixa estão localizadas junto à interface do banho com a atmosfera e à coluna de bolhas, região de interface aço-argônio, pois, são nestas regiões que ocorre a reação de remoção do hidrogênio (Eq. 1).

Por último, o resultado obtido na medição da planta (corrida A) foi comparado com o resultado alcançado pelo modelo e pela reta de regressão obtida anteriormente (Figura 7).

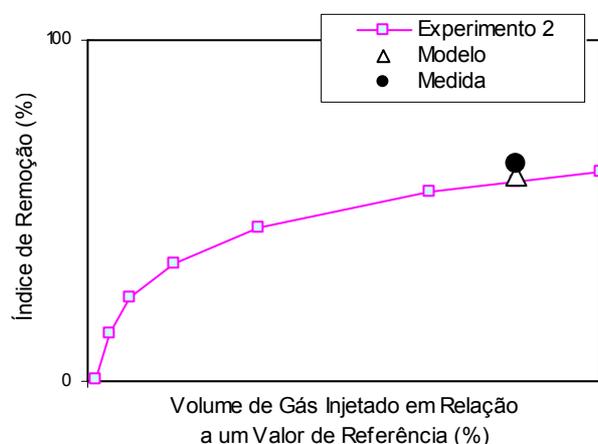


Figura 7: Índice de remoção de hidrogênio antes e após vácuo em função do volume de gás injetado.

O percentual de hidrogênio removido medido na planta é da ordem de 64%, ao passo que no modelo ficou em torno de 60%; porém, ambos os valores estão bem próximos da reta de regressão que representa a tendência principal dos resultados.

As razões para essa variação ainda estão sendo analisadas e fazem parte do aprofundamento da validação do modelo. Porém, numa primeira aproximação, o modelo mostrou-se extremamente coerente e sensível ao processo, sendo necessário a avaliação de outros casos, envolvendo: a influência do valor inicial de hidrogênio, da pressão mínima de vácuo e da vazão de argônio injetada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi realizado um estudo comparativo a fim de identificar a influência do posicionamento do plugue sobre o índice de remoção de hidrogênio após desgaseificação em uma estação do tipo VD/VOD, demonstrando que o plugue centrado na panela, para a configuração específica de panela da Gerdau Aços Especiais Piratini, apresenta uma maior tendência a auxiliar na remoção do hidrogênio que um plugue descentrado na panela. Para configurações distintas de painéis, a conclusão ora definida neste estudo pode não ser mais válida.

A partir dessa observação, foi desenvolvido um modelo matemático capaz de reproduzir os mapas de velocidade, pressão total e concentração adimensional no interior da panela com as condições iniciais pré-estabelecidas (hidrogênio inicial e pressão e volume de gás injetado).

Os resultados demonstraram que, para uma corrida onde foi injetado 500NL, o índice de remoção alcançado foi de 64%, enquanto que, o resultado do modelo foi de 60%; porém, ambos próximos ao valor de 58%, dado pela equação de regressão anteriormente determinada. Importante mencionar que estes valores de remoção de hidrogênio foram obtidos para os níveis iniciais de hidrogênio praticados na planta, condição esta influenciada por fatores como teor de umidade dos insumos, umidade do ar atmosférico etc.

A validação do modelo mostrou-se satisfatória, permitindo que se possa empregá-lo como uma ferramenta de otimização e melhor compreensão dos efeitos de variáveis de processo na remoção do hidrogênio durante o processo de desgaseificação.

Uma próxima etapa do projeto será a avaliação da capacidade do modelo em reproduzir os efeitos de posicionamentos de plugue sobre o índice de remoção e comparar com os dados obtidos experimentalmente na planta.

REFERÊNCIAS

- 1 CELIBERTO, A. M.; CARNINO, V. Influência do Método de Agitação do Banho sobre a Remoção de Hidrogênio Durante Etapa de Desgaseificação. In: **Anais do XXXVII Seminário de Aciaria Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM)**, Maio de 2006 – Porto Alegre / Brasil.
- 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 Research**, n° 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.
- 9 MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, R. The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems. **ISIJ International**, Vol. 35 (1995), No. 1, pp. 1-20.