

# SPAAQ – UMA FERRAMENTA DE APOIO NO CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE REFINO SECUNDÁRIO<sup>1</sup>

Rafael Skrzek Sicorski<sup>2</sup>  
Ismael Lis Alves Daoud<sup>2</sup>  
José Ernesto de Azevedo Nadalon<sup>3</sup>  
Leonardo Barboza Trindade<sup>4</sup>

## Resumo

O controle das variáveis de processo no refino secundário, tais como, vazão de gás e pressão de vácuo, associadas ao nível de gases dissolvidos no banho e à remoção de inclusões, são questões vitais na produção de aços de alta qualidade. Buscando oferecer uma ferramenta de apoio ao engenheiro de processo/produção está sendo desenvolvido um *software* que tem por objetivo auxiliar no controle e otimização dessas variáveis. O SPAAQ é uma ferramenta que tem como finalidade compilar informações que associem dados do processo com variáveis correlacionadas à qualidade do aço. Esse *software* é baseado em um banco de dados obtidos a partir de resultados de simulação numérica, modelagem experimental e dados industriais. A partir dessas informações serão criadas correlações que alimentarão o banco de dados. Em sua primeira versão, o *H-Online*, o mesmo contemplará um modelo de predição para remoção de hidrogênio do banho em função da vazão de injeção de gás e da pressão mínima de vácuo. Com essa ferramenta será possível estimar o nível de hidrogênio presente no aço durante a operação de degaseificação. Dessa forma o engenheiro terá uma ferramenta que agilizará sua tomada de decisões no controle do processo e na qualidade do produto.

**Palavras-chave:** Refino secundário; Remoção de gases (Hidrogênio); Modelamento matemático; *H-Online*.

## SPAAQ – A SUPPORT TOOL FOR THE CONTROL AND THE OPTIMIZATION OF THE SECONDARY REFINING STAGE OF THE STEELMAKING PROCESS<sup>1</sup>

### Abstract

The control of variables of the secondary refining process, such as gas flow, vacuum pressure, associated to the gases level dissolved in the bath and the inclusions removal are very important questions in the high quality steelmaking. Aiming to offer a support tool to the process/production engineer, a software is being developed to help in the control and optimization of these variables. SPAAQ is a tool to compile information which associates process data to variables correlated to the steel quality. This software is based on a data bank from numerical simulation results, experimental modelling and industrial data. From this information, correlations will be created which will feed the data bank. In its first version (*H-online*), the software will enable a prediction model to the hydrogen removal, due to gas injection flow and the vacuum minimum pressure. This tool will make it possible to estimate the hydrogen level and the inclusions in the steel during the degassing process. In this way, the engineer will have a tool which will make his decision faster in the process control and in the product quality

**Key words:** Secondary refining; Gases removal (hydrogen); Mathematical modeling; *H-Online*.

---

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

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre em Eng. Metalúrgica - Science Technology & Engineering – STE

<sup>3</sup> Engenheiro Civil - Science Technology & Engineering – STE

<sup>4</sup> Físico, Dr. Eng. Metalúrgica - Diretor Geral - Science Technology & Engineering – STE

## 1 INTRODUÇÃO

Visando a inovação e buscando oferecer uma ferramenta técnica de apoio ao engenheiro de processo e/ou produção na siderurgia, a STE está desenvolvendo em parceria com o LASID, e com o apoio do CNPq, o SPAAQ. Esse *software* é baseado em um banco de dados obtidos a partir de resultados de simulação numérica, modelagem experimental e dados industriais<sup>(1-5)</sup> e tem como objetivo condensar e compilar o maior número de informações a respeito das variáveis de processo que influenciam na qualidade do aço de uma maneira mais prática aos operadores de aciarias e engenheiros.

Com esta ferramenta seus usuários poderão visualizar e prever, com uma certa margem de confiabilidade, qual o nível de limpeza do aço que eles estão fabricando, em função das diferentes condições operacionais da sua aciaria, relacionadas aos fenômenos fluidodinâmicos e termodinâmicos.

O objetivo do presente trabalho é apresentar o primeiro módulo que está sendo desenvolvido nesse projeto, o *H-Online*. Essa primeira versão contemplará um modelo de predição para remoção de hidrogênio do aço, em função da vazão de injeção de gás e da pressão, em tanques de desgaseificação a vácuo com agitação por plugues.

Inicialmente, uma descrição do fenômeno e dos mecanismos de refino do hidrogênio será apresentada. Logo após, os modelos matemáticos em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e o modelo simplificado aplicado ao processo serão brevemente discutidos. Como resultados, a metodologia de determinação da constante de remoção  $k$  para o hidrogênio será apresentada, juntamente com o layout do *software* e as formas com que ele pode auxiliar na otimização do processo.

## 2 REMOÇÃO DE HIDROGÊNIO

É de conhecimento comum na siderurgia que gases como H, N e O são prejudiciais às propriedades mecânicas do aço, quando presentes em níveis não desejados. O hidrogênio, principalmente, é considerado um grande problema na produção, no processamento e na utilização dos aços. A solubilidade desse elemento no metal decresce significativamente durante a etapa de solidificação. Por esse motivo, ele precipita e recombina na sua forma molecular (gasosa), provocando trincas e causando danos estruturais ao aço.

Uma alternativa de reparar esses danos é através de tratamentos térmicos a altas temperaturas, removendo por difusão o hidrogênio do produto semi-acabado. No entanto, o custo dessa tecnologia é muito alto, tornando a otimização do processo de remoção de gases, em condições de baixa pressão, mais atraente.

Conforme será visto a seguir, o refino secundário empregando vácuo baseia-se no fato de que a redução da pressão resulta numa reação gasosa dos produtos fora de seu equilíbrio. Em outras palavras, com a redução da pressão o equilíbrio químico da reação de formação de gás muda, propiciando com que os gases sejam removidos do banho.

Segundo Rizzo<sup>(6)</sup>, os processos de desgaseificação a vácuo, atualmente mais utilizados pelas empresas siderúrgicas, podem ser subdivididos em duas categorias básicas:

- com circulação de aço passando por recipientes fora da panela (processo RH e DH, assim como suas variantes RH-KTB, RH-TOP e RH-OB);
- sem recirculação de aço líquido fora da panela, ou seja, o processo ocorrendo inteiramente na panela (ASEA-SKF, VD, VAD, VOD, AOD, ASM).

Essa segunda categoria também é chamada de desgaseificação em tanque, e será utilizada na apresentação da primeira versão do *software H-Online*. Cabe salientar, que os modelos numéricos e matemáticos utilizados nesse módulo também podem ser aplicados aos processos de remoção com sistemas recirculante do banho, desde que um modelo fluidodinâmico seja desenvolvido e adequado para os cálculos de transporte de massa que serão vistos a seguir.

Uma característica comum, entre todos os processos citados acima, é a injeção de gases (argônio ou nitrogênio) no banho. Além de auxiliar em diversos fatores como, na homogeneização térmica do aço, na flotação de inclusões, na dissolução de ligas, no auxílio da dessulfuração, desfosforação e desoxidação do aço, os gases inertes também proporcionam zonas de baixa pressão parcial, que são favoráveis à remoção de hidrogênio.

## 2.1 Mecanismo da Remoção Hidrogênio em Tanques e Desgaseificação

Durante o tratamento a vácuo, o hidrogênio é transferido entre o aço líquido e as bolhas de gás, assim como entre a escória e o metal líquido. Segundo Hallberg et al.<sup>(7)</sup>, enquanto as bolhas de argônio proporcionam sítios de baixa pressão parcial de hidrogênio, conduzindo-o para fora do metal, a escória absorve hidrogênio da atmosfera e transfere para o metal.

Segundo este mesmo autor, o hidrogênio dissolvido no banho é independente da pressão parcial de H<sub>2</sub> no gás, mas dependente da pressão parcial do vapor de água presente. Na prática industrial, parte da água é absorvida da matéria-prima das escórias sintéticas e outra parte é absorvida da pré-fusão da escória. Infelizmente, devido aos diferentes históricos de cada panela nas diversas corridas, é muito difícil estimar a quantidade de hidrogênio que se dissolve no aço proveniente das escórias. Além disso, é bem provável que durante o processo de desgaseificação, a quantidade de hidrogênio transferida da escória para o banho seja muito pequena. Por isso, o efeito do hidrogênio contido na escória não é considerado no cálculo do refino.

Por outro lado, a remoção de hidrogênio por bolhas de gás inerte pode ser estimada por meio de três etapas:

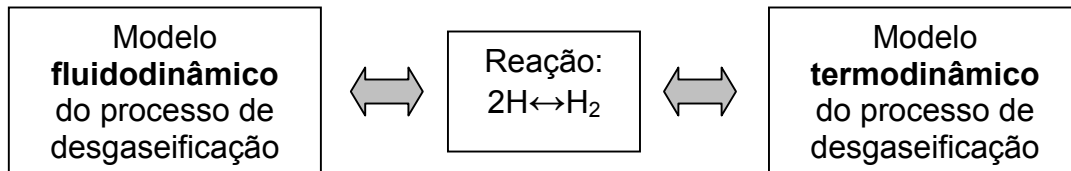
- Transporte do hidrogênio dissolvido (H) no banho;
- Reação química de formação de gás na superfície das bolhas:  
$$(2H \leftrightarrow H_2) \quad (1)$$
- Transporte do gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) nas bolhas de argônio.

Ainda, segundo Hallberg et al.<sup>(7)</sup>, nas temperaturas utilizadas na prática industrial, aproximadamente 1600°C, as reações químicas, como a de formação de H<sub>2</sub>, ocorrem muito rapidamente. Geralmente, muito mais rápido que os tempos de transporte do hidrogênio no banho. Portanto, a etapa responsável pelo controle do processo de remoção deve ser a que ocorre mais lentamente, ou seja, o transporte do hidrogênio no banho.

## 3 MODELO MATEMÁTICO EM CFD

Com a finalidade de modelar os mecanismos descritos anteriormente, simulações numéricas do escoamento bifásico aço-argônio, sob atmosfera de vácuo, são realizadas, juntamente com o transporte de hidrogênio. A Figura 1 apresenta esquematicamente o modelo em CFD utilizado. Esse modelo é baseado nas

equações fundamentais de transporte e nas equações de concentração de espécie de cada fase (H<sub>2</sub> na fase gás e H dissolvido na fase metal). Além disso, equações termodinâmicas são resolvidas para a reação (1), levando em consideração propriedades como o coeficiente de atividade do hidrogênio e as constantes de difusividade de H<sub>2</sub> e H, no argônio e no aço, respectivamente.



**Figura 1.** Modelo matemático em CFD do refino de hidrogênio.

### 3.1 Modelo Fluidodinâmico do Processo

As seguintes equações de transporte são resolvidas no cálculo do escoamento aço-argônio:

- Conservação de massa;
- Conservação de *momentum*;
- Energia cinética de turbulência;
- Taxa de dissipação da energia de turbulência;
- Conservação de espécie para H<sub>2</sub> e H dissolvido.

### 3.2 Modelo Termodinâmico do Processo

Segundo a Lei de Sievert<sup>(8-9)</sup>, na interface aço-argônio existe uma condição de equilíbrio dada pela razão entre a pressão parcial de gás e a concentração do hidrogênio dissolvido no banho:

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

onde  $f_H$  é o coeficiente de atividade;  $\Delta G^0$  é a energia livre de Gibbs para a reação (1);  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  é a temperatura do banho.

Conforme Hallberg et al.<sup>(7)</sup>, a energia livre de Gibbs padrão para reação (1) é dada por:

$$\Delta G^0 = -2(36480 + 30,46T) \quad (3)$$

e coeficiente de atividade é calculado através de:

$$\log_{10} f_H = \sum_{i=2}^n e_H^i [wt\%i] \quad (4)$$

onde  $e_H^i$  representa a iteração de um elemento  $i$  com H.

### 3.3 Metodologia de Solução

Para o processamento numérico das equações descritas anteriormente é utilizado o *software Ansys CFX 10.0*. Esse pacote numérico emprega o método de Volumes Finitos baseado em Elementos. Os cálculos, tanto do escoamento, quanto da remoção, são realizados em regime transiente.

Uma melhor descrição sobre os modelos matemáticos em CFD pode ser encontrada em (1-4). Esses trabalhos contêm mais informações a respeito das equações de transporte, propriedades físicas, condições de contorno, entre outros dados necessários na modelagem escoamento de painéis siderúrgicas.

## 4 MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO

A taxa com que o hidrogênio dissolvido é removido do banho pode ser estimada por meio da seguinte expressão<sup>(8-9)</sup>:

$$wt\%H_t = (wt\%H_0 - wt\%H_e)e^{-kAt/V} + wt\%H_e \quad (5)$$

onde  $k$  é o coeficiente de transferência de massa;  $A$ , a área interfacial aço-argônio;  $V$ , o volume de aço e  $wt\%H$ , a concentração de hidrogênio dissolvido. Os sub-índices  $0$ ,  $t$  e  $e$  indicam, respectivamente, a condição no tempo inicial, ao longo do processo e no estado de equilíbrio.

A concentração de hidrogênio no equilíbrio pode ser determinada por:

$$wt\%H_e = \sqrt{P_{H_2}} \cdot e^{(-8720 - 2.29T)/1,987T} \quad (6)$$

onde  $T$  é a temperatura do aço e  $P_{H_2}$  é a pressão parcial de hidrogênio na superfície do banho. Nesse caso,  $P_{H_2}$  é considerada a menor pressão disponível no sistema, ou seja, a pressão de vácuo no tanque.

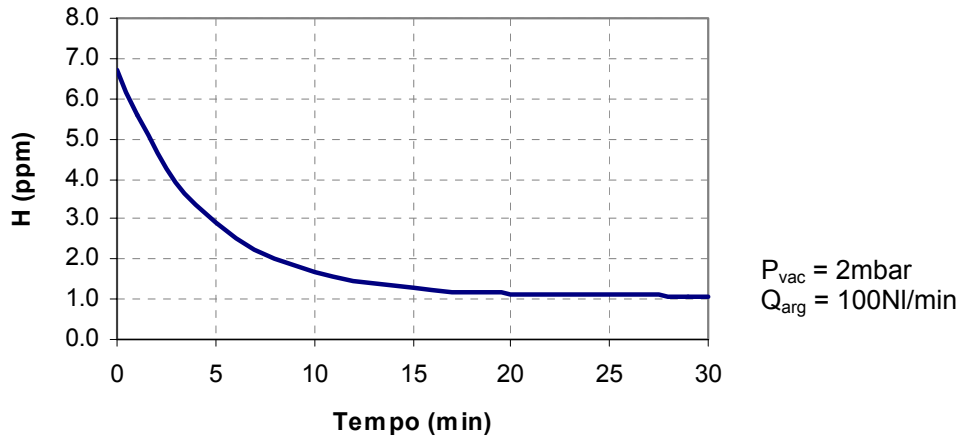
A única desvantagem do emprego da equação (5) na determinação dos índices de hidrogênio dissolvido no aço, durante o processo de desgaseificação, é que o coeficiente de transferência de massa  $k$  deve ser determinado empiricamente.

Entretanto, essa variável pode ser determinada por meio de simulações em CFD, de modo a obter-se uma correlação para  $k$ , em funções de parâmetros conhecidos, como por exemplo pressão e vazão de gás injetado.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Determinação do Coeficiente de Transferência de Massa

A Figura 2 apresenta uma curva típica de remoção obtida por meio da modelagem em CFD para uma panela hipotética de aproximadamente 100 toneladas. Nesse caso, a pressão de vácuo na câmara foi mantida constante em 2mbar e a vazão de argônio, aproximadamente, 100NI/min. Inicialmente, foi considerado que o banho possui 6,7ppm de H dissolvido.



**Figura 2.** Concentração de H dissolvido em uma panela hipotética de 100 toneladas.

A relação do volume de aço na panela pela área interfacial aço-argônio calculada nesse caso foi de aproximadamente 0,8. Por meio da equação (7), estimasse que a concentração de equilíbrio seja de 1,08ppm. De posse desses dados é possível calcular a constante de remoção de hidrogênio, por meio da seguinte expressão:

$$kt = -\ln\left(\frac{\text{wt}\%H_t - \text{wt}\%H_e}{\text{wt}\%H_0 - \text{wt}\%H_e}\right) \cdot \frac{V}{A} \quad (7)$$

Essa expressão nada mais é do que uma variação da equação (5), onde o termo da esquerda pode ser representado graficamente ao longo do tempo, de modo a se obter o valor de  $k$ . Nesse caso, o valor encontrado foi de 0,18 m/min.

Analisando a equação (7), observa-se que a constante de remoção  $k$  depende, principalmente, da concentração inicial de H, do volume de aço na panela, da área interfacial aço-argônio e da concentração de H no equilíbrio.

Conforme a equação (6), a concentração no equilíbrio pode ser relacionada com a pressão do vácuo. Por outro lado, a área interfacial, que é obtida por meio do modelo fluidodinâmico, está relacionada com a vazão de argônio injetado. Considerando que as mudanças de volume de aço em uma mesma panela podem ser desconsideradas, é possível a criação de uma correlação para a constante de remoção  $k$  do seguinte tipo:

$$k = f(H_0, P, Q) \quad (8)$$

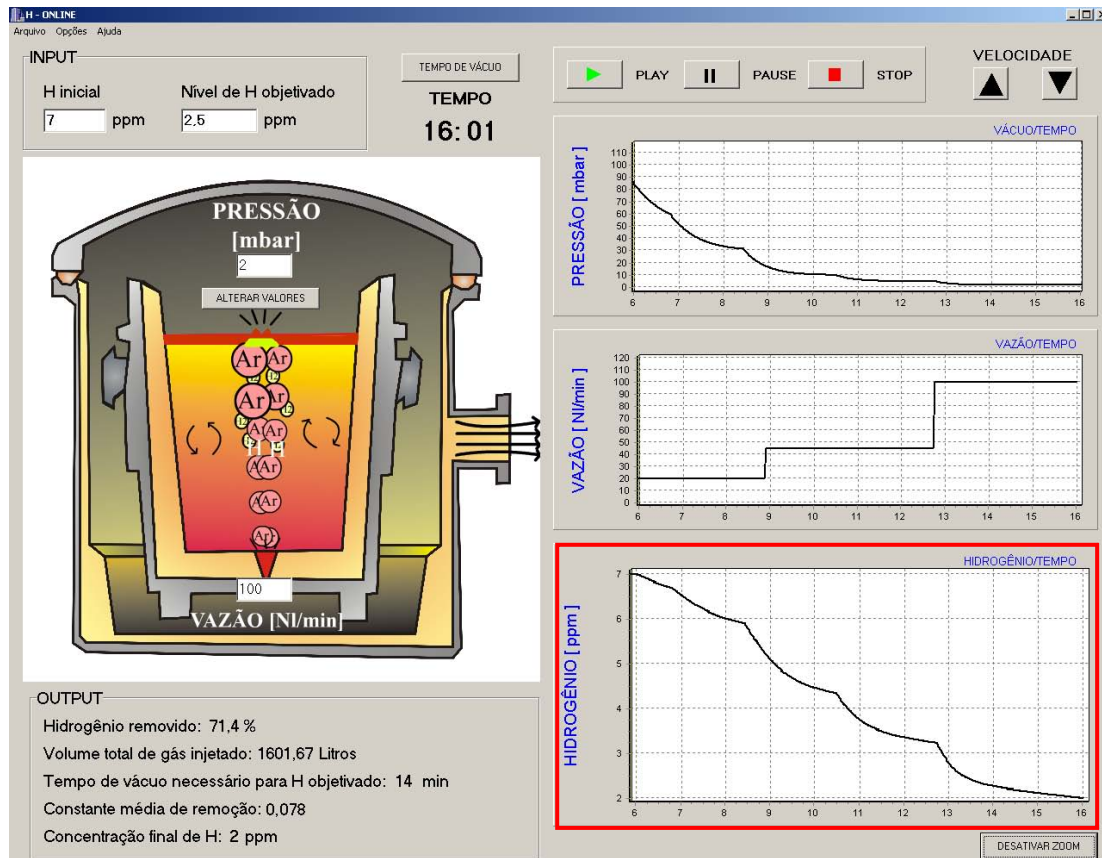
Ou seja, uma expressão função da concentração inicial de H, da pressão de vácuo no tanque e da vazão de argônio injetada.

Vale ressaltar, que para o desenvolvimento dessa correlação, é importante que o modelo em CFD esteja validado em planta e que uma série de casos, variando os parâmetros citados, seja resolvida computacionalmente. Destaca-se também, que uma correlação desenvolvida para um tanque de desgaseificação não é válida para outro equipamento, sendo necessário uma nova validação para o modelo. Isso se deve ao fato de que cada tanque possui diferentes características geométricas e operacionais.

## 5.2 Software *H-Online*

A Figura 3 apresenta o layout do software *H-Online* e um exemplo de aplicação na prática operacional. Durante o processo de desgaseificação, dados como pressão de vácuo e vazão de gás injetado podem ser facilmente monitorados.

Com o conhecimento prévio da quantidade inicial de hidrogênio dissolvido (ou pelo menos uma faixa da mesma) a concentração de hidrogênio ao longo do processo, pode ser monitorada a cada instante (gráfico em destaque na Figura 3).



**Figura 3.** Software *H-Online* aplicado a um processo de desgaseificação a vácuo.

Observa-se no exemplo acima, à medida que a pressão de vácuo diminui e a vazão de gás aumenta, as taxas de remoção de H são maiores.

Outros fatores, que podem ser monitorados constantemente ao longo do processo de desgaseificação são:

- Percentual de hidrogênio removido;
- Volume de gás injetado;
- Tempo necessário para atingir um determinado nível de H objetivado;
- Constante média de remoção;
- Demais variáveis de interesse para a operação.

Nota-se, portanto, que o *H-Online* possui grande potencial para auxiliar o operador durante o processo de desgaseificação. A principal motivação para o desenvolvimento desse modelo está diretamente ligada a algumas vantagens que a aplicação do mesmo pode trazer na prática.

## 5.3 Aplicações

### On-line

Como visto anteriormente, esse modelo acoplado ao sistema de controle de uma estação de desgaseificação pode ser uma ferramenta útil para o operador. Por exemplo, pode ainda auxiliar o operador a tomar as seguintes decisões:

- Escolha do momento da retirada de medidas que irão garantir a qualidade do aço;
- O mesmo pode optar por encerrar o processo, se por exemplo, os índices de hidrogênio calculados pelo modelo estiverem abaixo do objetivado, reduzindo assim o tempo de operação;
- O operador pode adiar ou liberar antecipadamente a panela para o lingotamento;
- Caso os índices de hidrogênio já estiverem nas faixas desejadas, o tempo de *rinsagem* para a remoção de inclusões pode ser aumentado.

### Off-line

Além disso, um engenheiro pode também utilizar as informações obtidas pelo *H-Online* para testar idéias novas, a fim de melhorar a performance de operação e acelerar o processo, melhorando assim a qualidade do aço.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se nesse trabalho que, por meio de seu primeiro módulo (*H-Online*), o SPAAQ é uma ferramenta técnica de alto cunho científico que vem para auxiliar operadores e engenheiros na busca por melhorias no processo produtivo de aços de alta qualidade.

Além disso, mostrou-se também que:

- A grande vantagem do modelo matemático, empregado no *H-Online*, é a praticidade com que as informações são obtidas. Após uma complexa modelagem numérica em CFD, pode-se obter uma correlação para o coeficiente de transferência  $k$ . Por fim, um modelo simplificado que realiza os cálculos de forma instantânea, podendo ser acoplado ao processo de desgaseificação a vácuo, é obtido;
- Para o desenvolvimento dessa correlação é importante que o modelo em CFD esteja validado em planta e que uma série de casos seja resolvida computacionalmente. A validade do *software* pode ser verificada através de medições diretamente em planta, por meio de um amostrador de hidrogênio, por exemplo;
- Uma correlação desenvolvida para um tanque de desgaseificação, não é válida para outro equipamento, sendo necessário uma nova validação para o modelo. Isso porque cada tanque possui diferentes características geométricas e operacionais.
- Os modelos matemáticos utilizados no módulo *H-Online* também podem ser aplicados aos processos de remoção com sistemas recirculante do banho (RH e DH), desde que um modelo fluidodinâmico seja desenvolvido e adequado para os cálculos de transporte de massa.



## Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro concedido para a realização desse projeto e ao LASID pela infra-estrutura e parceria.

## REFERÊNCIAS

- 1 TRINDADE, L.B., MORALES, J.A.P, VILELA, A.C.F., Modelamento físico e simulação numérica do comportamento da camada de escória numa panela agitada com gás. **XXXV Seminário de fusão, refino e solidificação dos metais**, Bahia, 2004.
- 2 SICORSKI, R.S., DAOUD, I.L.A, TRINDADE, L.B., VILELA, A.C.F., Análise numérica do escoamento em uma panela siderúrgica agitada por gás inerte. **XVI Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais**, Porto Alegre, 2004.
- 3 SICORSKI, R.S., DAOUD, I.L.A, MORALES, J.A.P, TRINDADE, L.B., VILELA, A.C.F., Estudo da influência do posicionamento e do número de plugs de injeção de gás em uma panela siderúrgica através da ferramenta de CFD. **XXXVI Seminário de fusão, refino e solidificação dos metais**, Vitória, 2005.
- 4 SICORSKI, R.S., DAOUD, I.L.A, NADALON, J.E.A., MORALES, J.A.P, TRINDADE, L.B., VILELA, A.C.F., Análise numérica dos fenômenos transientes de escoamento e mistura em uma panela siderúrgica de seção elíptica. **15th STEELMAKING CONFERENCE**, San Nicolas, Argentina, 2005.
- 5 TRINDADE, L.B., DAOUD, I.L.A, NADALON, J.E.A., SICORSKI, R.S., VILELA, A.C.F., A ferramenta de modelagem numérica e sua aplicação na fabricação de aços. **XXXVII Seminário de Aciaria**, Porto Alegre, 2006.
- 6 RIZZO, E.M.S. **Introdução aos processos de refino secundário dos aços**. São Paulo: ABM, 2006.
- 7 HALLBER, M., JONSSON, L., ALEXIS, J., **Proc. Scanmet I**, MEFOS, Lulea, Suécia, 1999.
- 8 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.
- 9 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.