

# ESTUDO DO MECANISMO DE FORMAÇÃO DE VÓRTICE DURANTE A ETAPA DE VAZAMENTO DO AÇO DA PANELA PARA O DISTRIBUIDOR DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA CST<sup>1</sup>

Sandro de Souza Santos<sup>2</sup>  
Henrique Silva Furtado<sup>2</sup>  
Carlos Antônio da Silva<sup>3</sup>  
Itavahn Alves da Silva<sup>3</sup>  
Dimas Bahiense Moreira<sup>4</sup>  
Varadarajan Seshadri<sup>5</sup>

## Resumo

Um modelo em acrílico na escala de 1:7 foi utilizado para simular as condições de processamento da CST na etapa de vazamento do aço da panela para o distribuidor do lingotamento contínuo, avaliando as condições mais propícias ao surgimento do vórtice e contramedidas para mitigá-lo. O modelo foi operado utilizando água como fluido e seguindo o critério de similaridade de Froude. O momento da inserção da segunda fase – nestes experimentos o ar – no canal de vazamento foi determinado através de sensores foto-elétricos e, para permitir uma avaliação do rendimento, o material residual foi pesado. Variáveis como tipo de fluxo residual imposto pelas rotas de processamento na CST, a vazão de drenagem, além de dispositivos antivórtice criados e transplantados da literatura foram avaliados através da modelagem física. Os fluxos residuais gerados por reatores RH ou IRUT, a altura inicial de líquido e outras variáveis não mostraram influência na variável resposta Volume Residual de líquido na panela, indicando que o fluxo de aço era interrompido pela capacidade de abastecimento radial do canal de saída – colapso da superfície. Como tal, a utilização de quebradores de vórtice se mostrou contra produtivo. O Volume Residual, nestas condições experimentais, se mostrou função apenas de vazão de lingotamento. Simulações adicionais foram realizadas induzindo um fluxo rotacional no fluido de forma a aumentar a propensão ao vórtice. Através desta simulação foi possível verificar que a injeção de gás pelo fundo da panela é eficiente para minimizar o volume residual na panela, assim como a utilização de barreiras próximas à região de vazamento.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Vórtice; Panela; Simulação física

## STUDY OF THE MECANISM OF VORTEX FORMATION DURING LADLE DRAINAGE TO THE CONTINUOUS CASTING TUNDISH AT CST

### Abstract

A 1:7 scale plexiglas model of Companhia Siderúrgica de Tubarão steelmaking ladle was built on the basis of Froude similarity criteria in order to assess the conditions during the final stages of draining. The passage of the second phase (air in these experiments) was detected by a photo-electric sensor and the mass of residual liquid inside the ladle was evaluated after weighing. It is known that premature closing of the teeming nozzle leads to poor yield. And also slag or air should not be transferred to the tundish since steel cleanliness would be affected. The objective of cold model experiments was to evaluate means of maximizing yield without compromising on quality. Study of variables included the type of residual flow in respect of several routes of processing such as: RH degasser, IRUT reactor, the drainage flow rate, in addition to anti-vortex devices. It was found that RH or IRUT processing as well as the initial level of liquid did not significantly affect the results. Under these circumstances the mass of liquid retained at onset of second phase drainage was influenced by the flow rate only. At the final stages of drainage, the liquid surface collapse was dictated by the bottom ladle capacity of supplying liquid in the radial direction to the outlet. Vortex formation was not important giving support to the findings reported here. As a consequence vortex breakers were found deleterious under these set of conditions. Additional simulations were accomplished by inducing a rotational flow in order to increase the likelihood of vortex formation. Gas injection through the pouring nozzle, vortex breakers, slopped bottoms have been found effective adding support to the radial flow mechanism of drainage reported under regular conditions.

**Key words:** Continuous casting; Ladle; Simulation; Vortex.

<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 Metalurgista, MSc, Membro da ABM, Especialista de Lingotamento Contínuo da CST Arcelor Brasil, Vitória, ES, Brasil

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc, PhD, Membro da ABM, Professor DEMET/UFOP

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, Gerente da Divisão de Controle Técnico do Aço da CST Arcelor Brasil, Vitória, ES, Brasil

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista, Dr. Ing, Membro da ABM, Professor DEMET/UFMG

## 1 INTRODUÇÃO

A Indústria Siderúrgica atual vem focando o seu desenvolvimento na melhoria da qualidade dos materiais produzidos de forma a atender às cada vez mais rígidas aplicações. No entanto, mesmo com esta busca constante por qualidade, o custo de fabricação é outro fator que não pode ser desprezado, pois o objetivo de qualquer negócio é a satisfação dos acionistas e das partes interessadas.

Neste contexto, a Aciaria torna-se de grande valor potencial de estudo, uma vez que, além de agregar cerca de 30% ao custo do produto acabado, ainda pode ser responsável por diversos defeitos observados junto ao cliente final.

Na Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), o aço percorre um circuito compreendendo o Convertedor de sopro combinado 1 ou 2 – Panela – Estação de Desgaseificação à vácuo (RH) ou Estação de tratamento de panela (IRUT) – Lingotamento Contínuo 1 ou 2.

Durante o processo, quando o aço líquido é transferido desde um reator a outro, o eventual surgimento do vórtice proporciona a passagem de escória de um reator àquele imediatamente subsequente.

O presente trabalho tem como objetivo estudar os mecanismos de formação do vórtice durante a drenagem do aço da panela para o distribuidor do lingotamento contínuo com foco na redução da sobra de aço na panela e minimização da passagem de escória da panela para o distribuidor.

## 2 METODOLOGIA

De forma a simular as condições propostas, foi utilizado um modelo de panela em acrílico, construído na escala 1:7, representado na Figura 1, e operado de acordo com o critério de similaridade de Froude<sup>(1)</sup>.



**Figura 1** - Foto da Montagem Experimental

Na prática industrial corrente na CST as taxas de lingotamento variam de 8ton/min a 12ton/min. Assim, as faixas de vazão no modelo variaram de 9 a 13litros/min, de acordo com o critério citado.

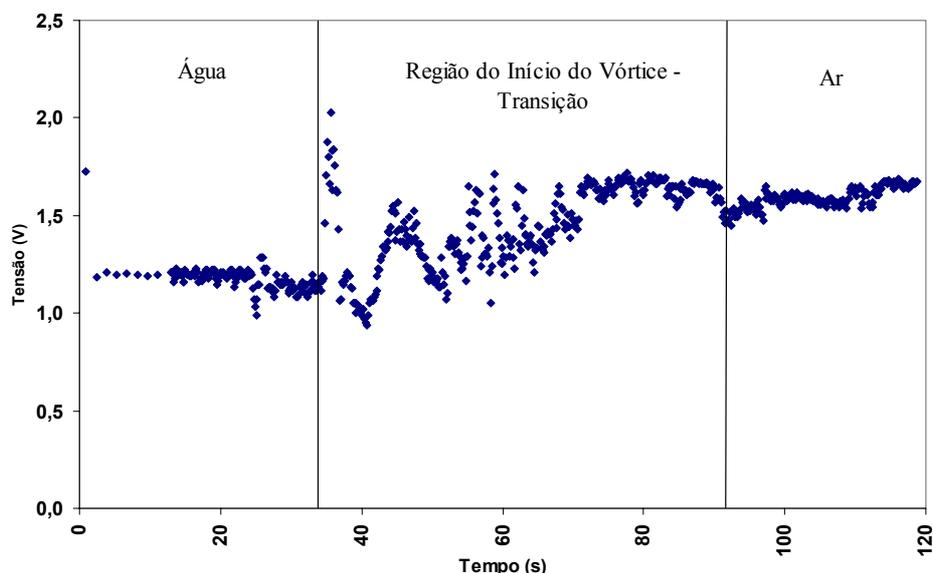
A Tabela 1 apresenta as principais características do modelo em comparação à panela utilizada no processo industrial da Companhia Siderúrgica de Tubarão.

**Tabela 1** - Características da Panela – Protótipo x Modelo

| Descrição                          | Protótipo         | Modelo               |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Volume de Líquido                  | 45 m <sup>3</sup> | 0,131 m <sup>3</sup> |
| Diâmetro interno do topo da panela | 4,20 m            | 0,60 m               |
| Diâmetro interno da base da panela | 3,65 m            | 0,52 m               |
| Altura da panela                   | 4,40 m            | 0,63 m               |
| Diâmetro do furo de vazamento      | 0,080 m           | 0,0114 m             |

A variável resposta utilizada para caracterizar a incidência do vórtice no processo foi o volume de líquido retido no modelo, após a detecção, pela célula fotoelétrica, da passagem de ar pelo canal de vazamento.

Durante a operação do modelo, um sensor recebe a luz, que atravessa o fluxo de água, emitida da fonte posicionada no lado oposto do tubo e registra um determinado valor de tensão. Quando do início da passagem de ar (presença do Vórtice), o valor medido sofre uma alteração; desta forma, é possível registrar o início da formação do vórtice. A Figura 2 apresenta uma curva característica da leitura do sensor fotoelétrico.



**Figura 2** – Curva Característica de Resposta do Sensor Fotoelétrico.

A formação do vórtice é dependente tanto de condições geométricas particulares junto ao canal de vazamento, quanto do campo de velocidades, pré-existentes ao início do vazamento. A pré-existência de fluxos rotacionais aumenta a incidência do vórtice; desta forma os experimentos foram divididos em duas etapas:

- Avaliação nas condições do processo industrial;
- Avaliação através da indução de campo rotacional.

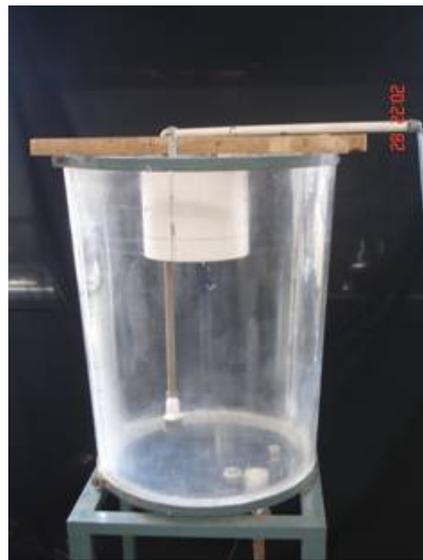
## 2.1 Campo Inicial de Velocidades

Na rota normal da CST o aço é distribuído ao Lingotamento Contínuo a partir de panela advinda do IRUT ou RH. Cada um destes reatores induz um padrão de fluxo e uma propensão específica a vórtice. Estes padrões foram simulados em modelos

em escala dos reatores. As Figuras 3 e 4 apresentam a montagem para a simulação do reator RH e IRUT respectivamente.



**Figura 3** – Vista Geral do Modelo com Réplica do Reator RH.



**Figura 4** – Vista Geral do Modelo com Réplica do Reator IRUT.

Para comparar a influência dos fluxos mencionados acima foi realizado um experimento a partir do repouso absoluto, ou seja, após trinta minutos de espera entre o fim do enchimento da panela e o início do teste. Nesta situação não foi verificado movimento residual do líquido, decorrente do enchimento da panela.

Além do exposto acima, para amplificar a possibilidade de formação de vórtice durante a drenagem foram realizados testes adicionais com alimentação tangencial da água junto à parede da panela, com entrada a 30 graus em relação à horizontal. A panela não se enchia totalmente, em média a 1/3 da capacidade durante cerca 3~4 minutos. Estes valores correspondem a uma vazão média de 14 litro/min e uma velocidade média de 0,2 m/s.

## 2.2 Dispositivos Anti-vórtice

Objetivando reduzir o volume residual na panela, diversas condições foram simuladas: Barreiras próximas ao furo de vazamento (Figuras 5 e 6) citadas por Davila<sup>(2)</sup>, Hammerschimid<sup>(3)</sup> e Ajmani<sup>(4)</sup>, injeção de ar através de agulhas posicionadas na região de vazamento sugeridas por Lange<sup>(5)</sup>, a utilização de um fundo falso (Figura 7) criado a partir da otimização do fundo estudado por Heaslip<sup>(6)</sup>, além da interação das condições acima como, por exemplo: Fundo falso com injeção de ar e Barreiras com injeção de ar.



**Figura 5** – Anteparo Anti-Vórtice Disposição A.



**Figura 6** – Anteparo Anti-Vórtice Disposição B.

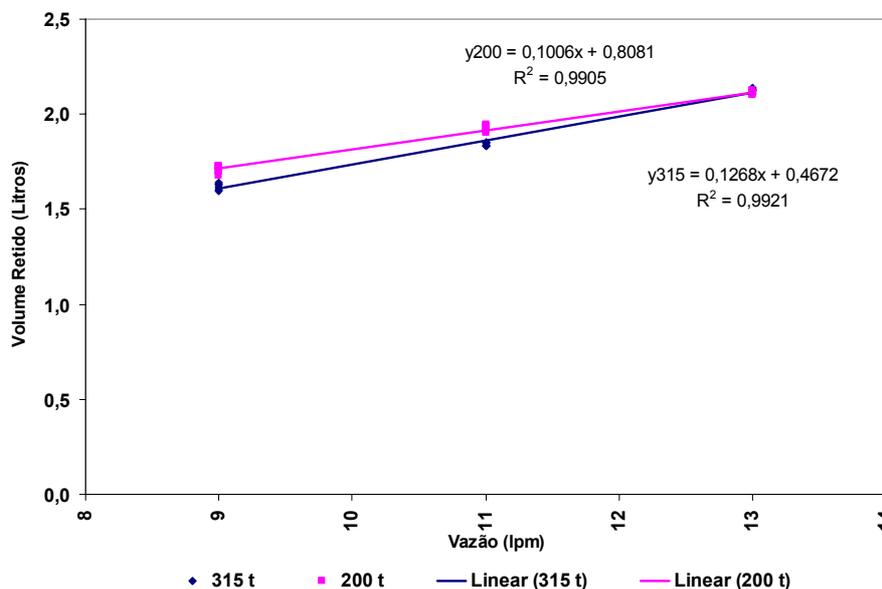


**Figura 7** – Fundo Falso para Reduzir Volume Residual.

### 3 RESULTADOS

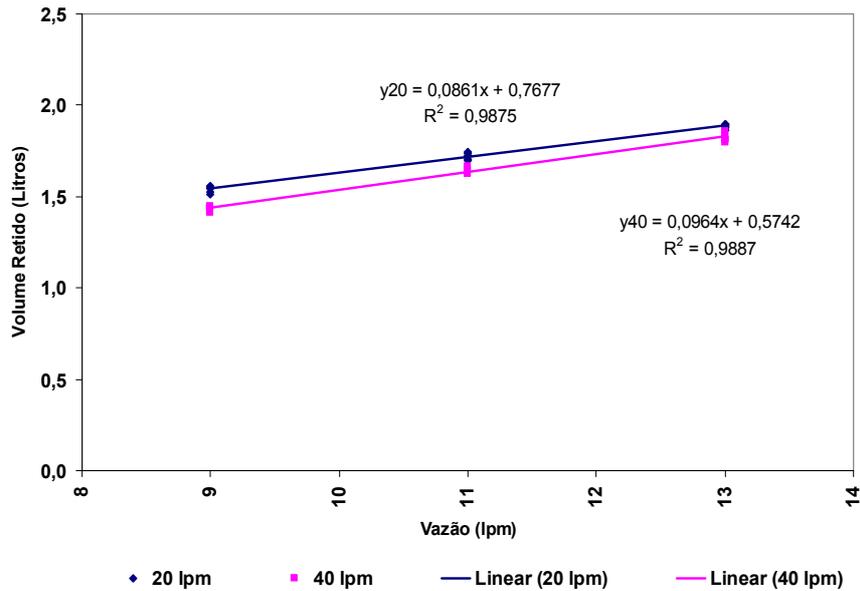
Inicialmente foram realizados experimentos com dois níveis de fluido, equivalentes a 315ton e 200ton de aço em uma panela industrial. Foram simuladas diversas condições de fluxo, sendo as vazões escolhidas de acordo com o já citado adimensional de Froude, de modo a retratar taxas de lingotamento de 8 a 12ton/minuto.

A Figura 8 apresenta os resultados com o fluido na condição inicial de repouso nos dois níveis propostos, equivalente a 200 e 315 toneladas de aço. Por repouso entende-se a ausência de movimentação do fluido ao início de vazamento: para tanto o vazamento somente foi iniciado após um tempo de espera de 30 minutos, julgado suficiente para a dissipação de qualquer movimento residual provocado pela operação de enchimento da panela.

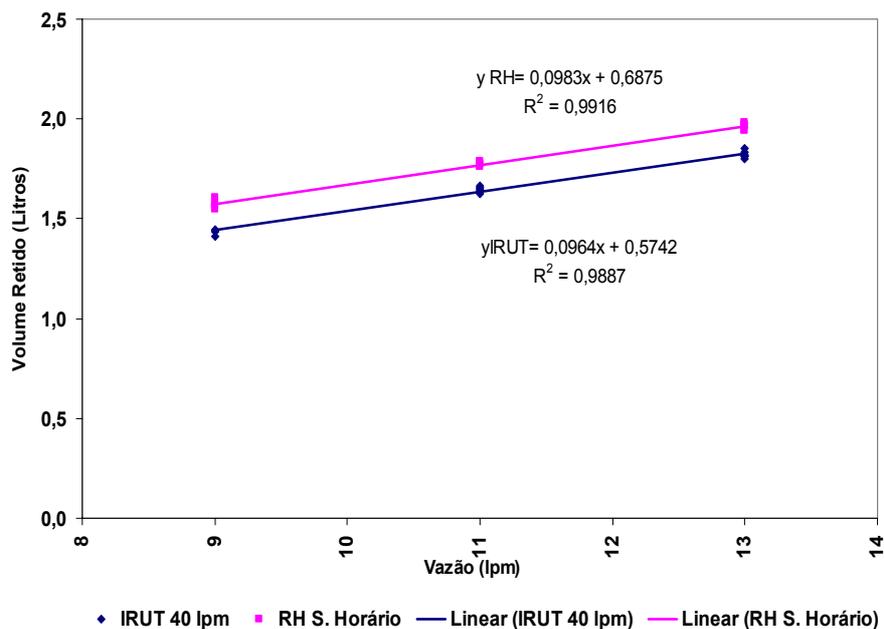


**Figura 8** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Enchimento Inicial: 200 e 315t Partindo do Repouso.

As simulações seguintes foram realizadas considerando os diferentes tipos de fluxo possíveis para um mesmo nível inicial de 132 litros (315t). A Figura 9 apresenta uma comparação entre resultados correspondentes às vazões de misturamento de 20l/min e 40l/min em um modelo de reator IRUT. A Figura 10 compara os resultados relativos ao modelo do IRUT em uma vazão de 40l/min e a circulação no sentido horário em um reator RH.



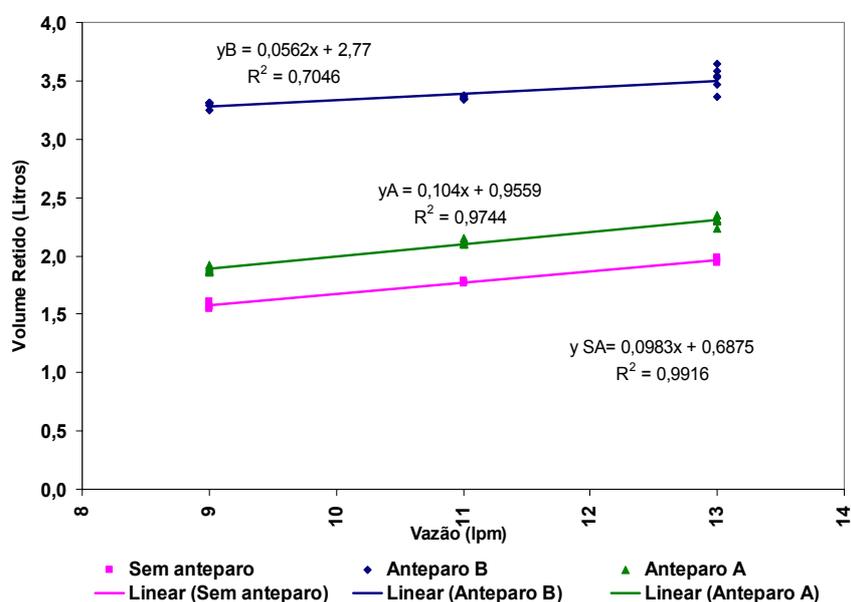
**Figura 9** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Vazão de Misturamento no IRUT.



**Figura 10** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Circulação do RH Sentido Horário e IRUT com Vazão de Misturamento de 40l/min.

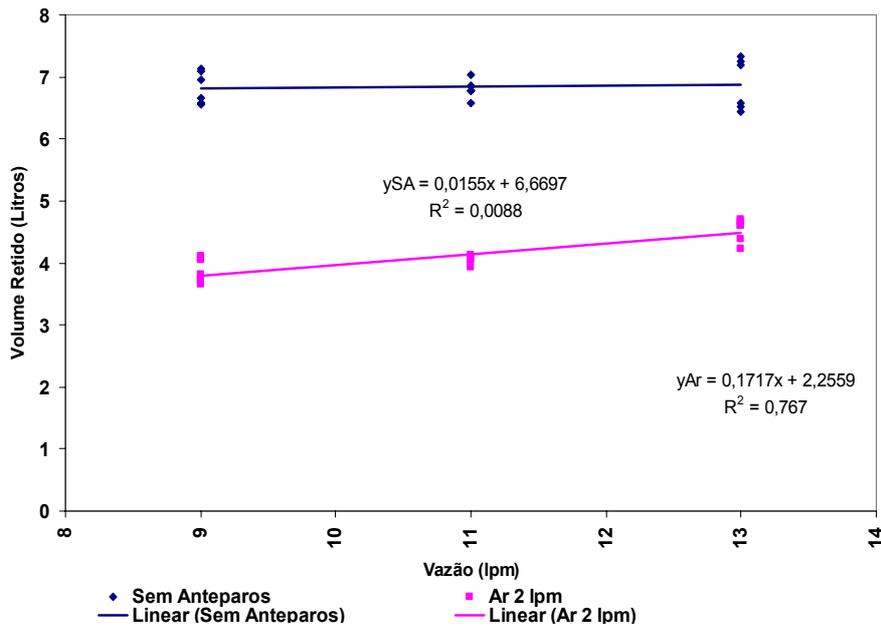
De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 8 a 10 não existe diferença significativa entre RH em diferentes sentidos de circulação, IRUT com vazões diferentes de misturamento, nível inicial de líquido na panela, comparados com a situação em que a drenagem começa do repouso (após 30 minutos de espera). Os tempos de drenagem parecem ser longos o suficiente para eliminar qualquer diferença advinda do campo inicial de velocidades e somente a vazão de lingotamento influencia o processo.

Foram posicionados anteparos na região do canal de saída com o objetivo de reduzir o volume residual na panela. A Figura 11 apresenta uma comparação entre três situações do RH: com circulação no sentido horário e 315 t: sem anteparos, com anteparos tipo A (todos os três na direção radial) e com anteparos tipo B. De acordo com os resultados, nas condições experimentais estudadas, anteparos não são efetivos na redução do volume residual na panela e, inclusive, a presença dos mesmos pode aumentar o residual de líquido. Esta tendência reforça o argumento que, nas experiências relatadas até aqui, nos estágios finais de drenagem o mecanismo seria controlado pela capacidade de abastecimento ao furo de vazamento; os anteparos seriam obstáculos ao abastecimento. De fato, o posicionamento dos obstáculos de acordo com o esquema A (todos na direção radial) se mostra substancialmente menos deletério que o posicionamento de acordo com o esquema B.



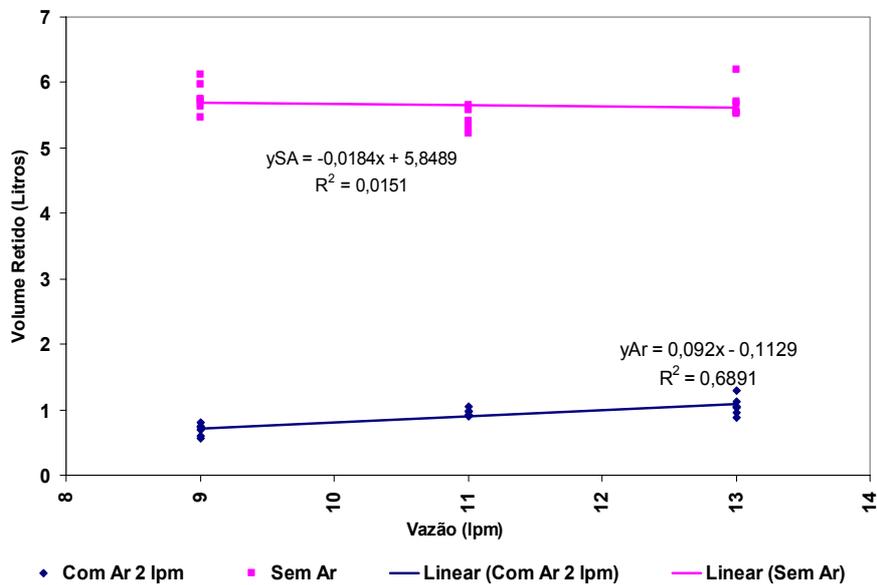
**Figura 11** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Situações do RH com Circulação no Sentido Horário com 132 litros (315 t): sem Anteparos, com Anteparos tipo A e com Anteparos tipo B.

Realizadas as simulações referentes a condições típicas de processo, claramente desfavoráveis à formação de vórtices, foram realizadas avaliações com campo rotacional forçado, ou seja, alimentação da água realizada tangencialmente conforme detalhado no capítulo anterior. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos com a utilização da injeção de ar na região do canal de vazamento.



**Figura 12** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2l/min.

Avaliou-se também a possibilidade de utilização conjunta de fundo falso e injeção de ar, vide Figura 13. A combinação parece efetiva, notando-se que o emprego do fundo falso acoplado à injeção de ar reduz o material retido ao nível de 1 litro. Ressalta-se, entretanto, que a utilização do fundo falso poderia implicar em redução do volume útil da panela em cerca de 7 toneladas.



**Figura 13** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, Fundo Falso com Injeção de Ar 2l/min e sem Injeção de Ar.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados das simulações realizadas nas condições de processo da CST mostraram que são compatíveis com drenagem de líquido no sentido radial, com abastecimento provindo do fundo da panela. Portanto com a ausência de vórtice. Estes sugerem ainda, que o volume residual possui uma relação direta com a vazão de esgotamento, tendência confirmada, por exemplo, pelos estudos de Heaslip<sup>(6)</sup>. Os experimentos de Davila<sup>(2)</sup> mostram resultados divergentes.

Pôde-se verificar que quando a panela é alimentada tangencialmente, o que provoca um movimento rotacional, o volume residual da mesma tende a aumentar em cerca de 400%. Sugere-se que este aumento do movimento rotacional aumenta o potencial para o surgimento do vórtice.

Os diversos dispositivos anti-vórtice apresentados neste trabalho mostraram-se eficientes na redução do volume residual na panela, mostrando em certos casos, que o volume residual era compatível à uma condição com ausência de vórtice, sugerindo que a eliminação completa do mesmo foi conseguida.

## REFERÊNCIAS

- 1 SZEKELY, JULIAN, THEMELIS, NICKOAS J.. Rate Phenomena in Process Metallurgy., John Wiley & S. Sons, 1971, p. 784.
- 2 DAVILA, O., FERRO, L., MORALES, R. D., DEMEDICES, G. L., PEREZ, P. R., Physical Model and Mathematical Simulations of Ladle Draining Operations, AISTech Proceedings – Volume I, p. 873-899, 2005.
- 3 HAMMERSCHMID, P. et al., Vortex Formation during Drainage of Metallurgical Vessels, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 11, N° 6, p. 332-339, 1984.
- 4 AJMANI, S. K.; CHOUDHARY, S. K., Cold Model study of Vortexing in Ladle and Tundish, TATA Search, p. 103-109, 2002.
- 5 LANGE, M., CLAES, J., JOLY, A., Clean Steel Block – New Developments Towards Clean Steel, Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques, v 100, n° 6, June, p. 577-582e, 2003.
- 6 HEASLIP, L. J.; DORRICOTT, J. D.; RICHAUD, J.; ROGLER, J. P.; ALVES, W. A., Yield Improvement Through Enhanced Ladle Bottom Design (ELBY), XXXVII Seminário de Aciaria – Internacional, p. 515-524, 2006.