

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESCÓRIA / AÇO DURANTE O ESGOTAMENTO DA PANELA ATRAVÉS DE MODELAGEM FÍSICA ¹

César Takaci Sato ²

Márcio Ramires ³

Roberto Parreiras Tavares⁴

Resumo

Neste estudo, foi avaliado o comportamento da interface água e óleo de silicone (simulando, respectivamente, aço/escória) no momento do escoamento da panela para o distribuidor. Para a realização dos testes, foi executado um Planejamento De Experimentos (PDE ou DOE) em um modelo físico da panela da ArcelorMittal Monlevade, na escala 1:3. O estudo mostrou que a simulação física do esvaziamento da panela foi eficaz para identificar os parâmetros mais importantes para avaliar o vórtice e minimizar o arraste e emulsificação do ar ou óleo de silicone com a água para a válvula de saída. Foi concluído que houve uma diferença significativa entre as alturas críticas quando se simulou o esvaziamento da panela com e sem a presença do óleo de silicone (em valores médios, 12mm e 3mm, respectivamente). Outros fatores que mostraram efeitos significativos sobre a altura crítica foram a vazão de saída da panela e a presença do dispositivo anti-vórtice, levando em consideração a presença de óleo de silicone.

Palavras-chave: Escória; Esgotamento; Modelo físico; Panela.

SIMULATION OF SLAG / STEEL DURING THE LADLE TEEMING USING A WATER MODEL

Abstract

In the present investigation, vortex formation during the transfer of liquid steel from the ladle to the tundish was studied using a physical model of the ladle used at ArcelorMittal Monlevade (1:3 scale). In this model, water was used to simulate liquid steel and silicon oil to simulate slag. A DOE (Design Of Experiments) was implemented and the effects of some factors and levels on vortex formation were analyzed. Based on the results of the present investigation, some observations can be described. By comparing the simulation results of water with or without silicon oil, a significant difference was found for the critical height (12mm and 3mm). It is an important observation to highlight due to the fact that simulations using only water and simulations using water and supernatant oil are not comparable. Besides that, the results showed significant effects from the water flow rate and the presence of anti-vortex device, considering the use of silicon oil.

Key words: Ladle; Slag; Teeming; Physical model.

¹ *Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil*

² *Engenheiro Metalurgista, Controle de Processo de Aciaria – Ling. Contínuo.*

³ *Administrador, Instrumentação da Aciaria.*

⁴ *Professor Doutor da Escola Engenharia da UFMG.*

1 INTRODUÇÃO

A escória é essencial para a produção do aço, protegendo-o contra reoxidações pelo ar e controlando as perdas térmicas, além disso, capta as inclusões aumentando a sua limpidez. Porém, uma passagem inadequada da panela para o distribuidor aumenta o volume de escória, potencializando o ataque químico dos refratários, limitando o número de corridas por seqüência. Uma técnica usual para evitar a presença de escória da panela no distribuidor é interromper prematuramente o vazamento, porém, esta ação leva a uma quantidade residual de aço significativa na panela, implicando em perda no rendimento metálico e, conseqüentemente, no aumento do custo de produção do aço.⁽¹⁻²⁾

Atualmente, é bastante difundida a simulação do comportamento de escoamento do aço, avaliado em modelos físicos. A modelagem física é uma ferramenta poderosa para um entendimento melhor do processo de fabricação do aço. Os modelos físicos são, geralmente, construídos em acrílico e a água é um fluido adequado para modelar o aço líquido, pois a viscosidade cinemática e as linhas de fluxo são comparáveis. Estes fatores favorecem o estudo através de modelagem física, pois se pode trabalhar em temperatura ambiente e com um baixo custo quando comparado a processos industriais. Especificamente para o modelo físico da panela, o conhecimento do esvaziamento pode indicar se há a possibilidade de implementar alguma ação para otimizar o rendimento metálico sem comprometer a qualidade do aço. Além disso, o conhecimento do comportamento de vórtices e emulsificações na panela é muito útil para avaliar o uso de dispositivos anti-vórtices e de medidas preventivas para reduzir a ocorrência de arraste de escória, minimizando a possibilidade de macro-inclusões serem arrastadas para o distribuidor, podendo chegar até os veios, contaminando o aço.⁽³⁻⁶⁾

Neste sentido, este trabalho visa simular a drenagem da panela e estudar o comportamento do conjunto óleo de silicone e água na formação do vórtice em um modelo físico. Além disso, estudar os efeitos das variáveis de processo significativas, assim como avaliar os dispositivos e procedimentos para reduzir/eliminar a formação do vórtice durante a simulação do esgotamento de aço da panela.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para simular o escoamento de aço, foram construídos modelos físicos da panela em acrílico e das válvulas de saída em teflon, cuja escala utilizada foi de 1:3 em relação à panela da ArcelorMittal Monlevade. O desenho das peças foi baseado no projeto industrial visando similaridade geométrica entre as configurações.

A Figura 1 apresenta uma ilustração do esquema de montagem do modelo físico da panela.

As Figuras 2 e 3 mostram as imagens e detalhes da panela e dos instrumentos montados no laboratório de modelagem física da Usina de Monlevade.

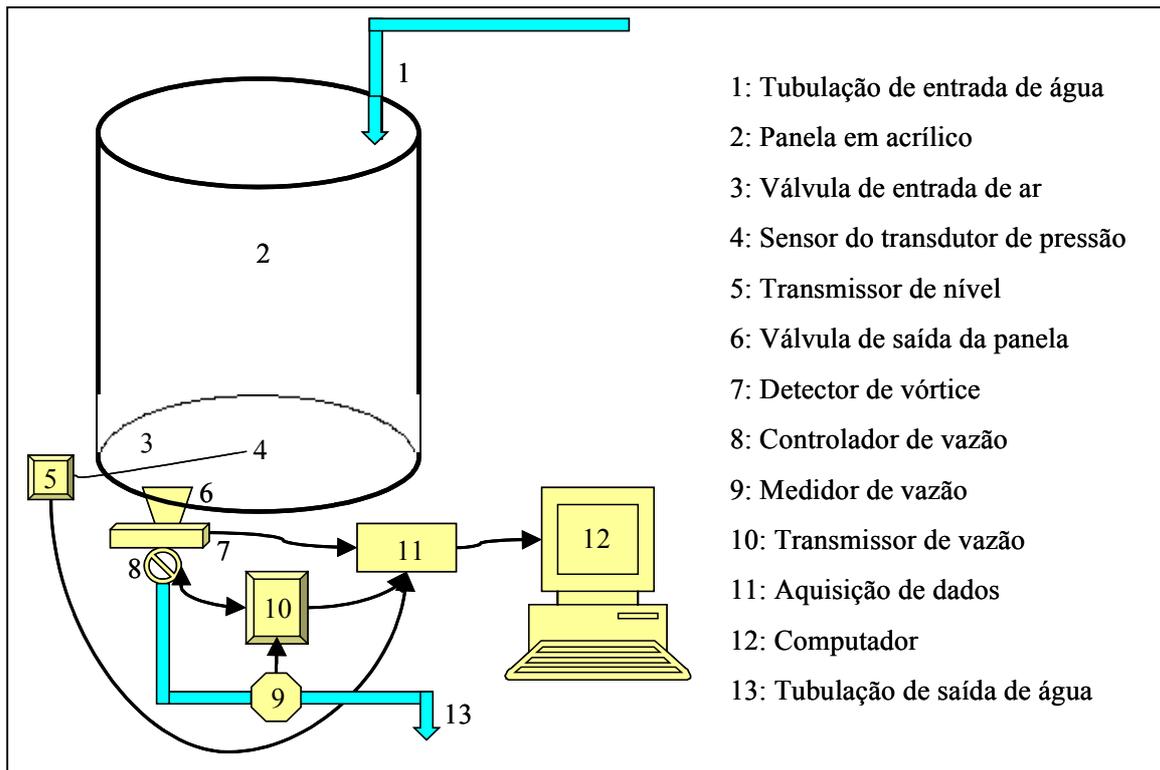


Figura 1: Esquema de montagem do modelo físico da panela.

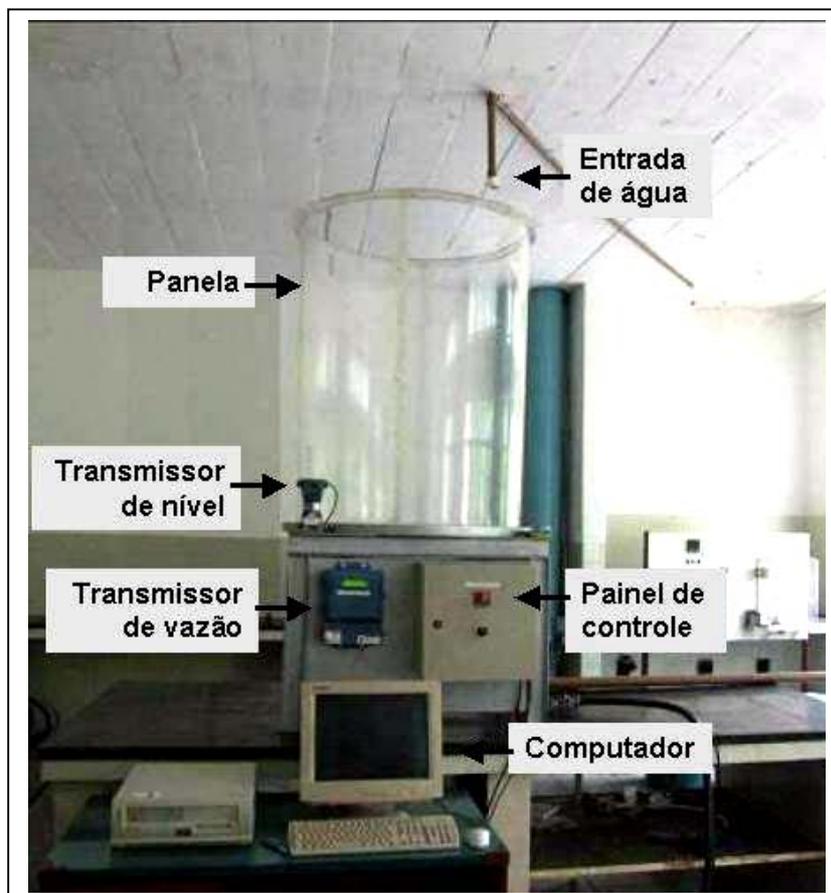


Figura 2: Vista principal do modelo físico da panela.

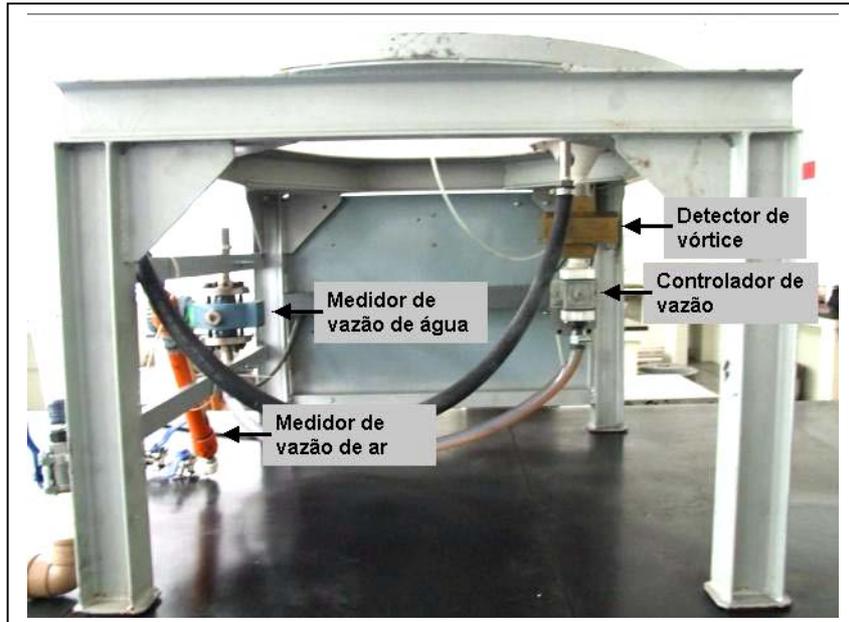


Figura 3: Detalhes do modelo físico da panela.

2.2 Metodologia

Para simular a intensidade da emulsificação óleo de silicone/água, foi utilizada a ferramenta DOE (Design Of Experiments) para avaliação dos seguintes fatores e níveis:

- Vazão de saída da água da panela (19 l/min ou 28 l/min);
- Tempo de espera (1 minuto ou 30 minutos);
- Rinsagem na panela (Sem ou Com presença de borbulhamento de ar);
- Dispositivos anti-vórtice (Sem ou Com presença do dispositivo anti-vórtice); e
- Fluido sobrenadante (Sem ou Com presença de óleo de silicone de 50cst).

A variável resposta considerada foi a altura de água no momento em que o detector de escória indicou o arraste do fluido sobrenadante para o orifício de saída (altura crítica).⁽⁷⁾

Em todos os testes, água à temperatura ambiente foi utilizada para simular o aço. Cada experimento consistiu no enchimento da panela de acrílico com água no sentido axial (vazão de 94 l/min) até o nível de 86,3% da altura total da panela. Este valor é igual 1036 mm de coluna de água dentro da panela de acrílico, valor equivalente a 130 toneladas de aço na panela industrial.

Logo após atingir o nível de 86,3%, desligou-se a bomba de água e iniciou-se a contagem do tempo de espera. De acordo com o planejamento de experimentos, eram inseridos ou não, o dispositivo anti-vórtice e/ou o óleo de silicone (equivalente à espessura de 2 cm e viscosidade de 50 centistroke com adição de corante azul para facilitar a visualização). Após o tempo de espera de 1 minuto ou 30 minutos, abriu-se a panela e, dependendo dos casos, injetava-se ou não ar pelo plug poroso durante o esvaziamento (vazão de injeção de ar foi de 0,5 l/min). Para a vazão de saída da panela, que indiretamente é a velocidade de lingotamento, foram escolhidos os níveis de 19 l/min ou 28 l/min para serem avaliados no DOE (equivalente a 2m/min e 3m/min de velocidade de lingotamento, respectivamente).

Ao longo dos experimentos, o dispositivo Datalogger DT600 armazenava todas as informações provenientes dos medidores de nível de água, de vazão e do

detector de vórtice. Com essas informações, foi possível avaliar a altura crítica no escoamento da panela, com boa detecção da formação do vórtice e da emulsificação do óleo de silicone ou ar. Além disso, todos os testes foram filmados para avaliação visual do fenômeno.

A configuração do dispositivo anti-vórtice testado foi baseada numa sugestão do corpo técnico da aciaria, onde foi proposta uma configuração simples e de fácil manuseio. O dispositivo sugerido tinha um desenho próximo a de um disco sobrenadante, pois dispositivos fixos próximos à saída da panela têm a desvantagem de dificultar a colocação de areia para a abertura da panela, assim como o desgaste natural ao longo das corridas no processo industrial. Além disso, a citação de Steffen,⁽⁶⁾ onde válvulas tampões tendem a minimizar a formação de vórtice, também favoreceu o design do dispositivo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada teste, onde os parâmetros de interesse foram selecionados de acordo com o “DOE”, foi registrado o nível de água no momento em que o detector de escória identificava a passagem do fluido sobrenadante pela válvula de saída.

Para distinguir os valores normais (quando só há a passagem de água pura) e os valores emitidos pelo detector quando há a presença da passagem de óleo ou ar, foi adotado o valor de 4% de variação (valor igual ao processo industrial), isto é, caso a diferença de milivoltagem a cada segundo seja maior que 4%, foi considerado que houve uma passagem significativa de ar ou óleo de silicone junto com a água. A Figura 4 ilustra o comportamento do detector de escória e a altura de água dentro da panela ao longo do tempo.

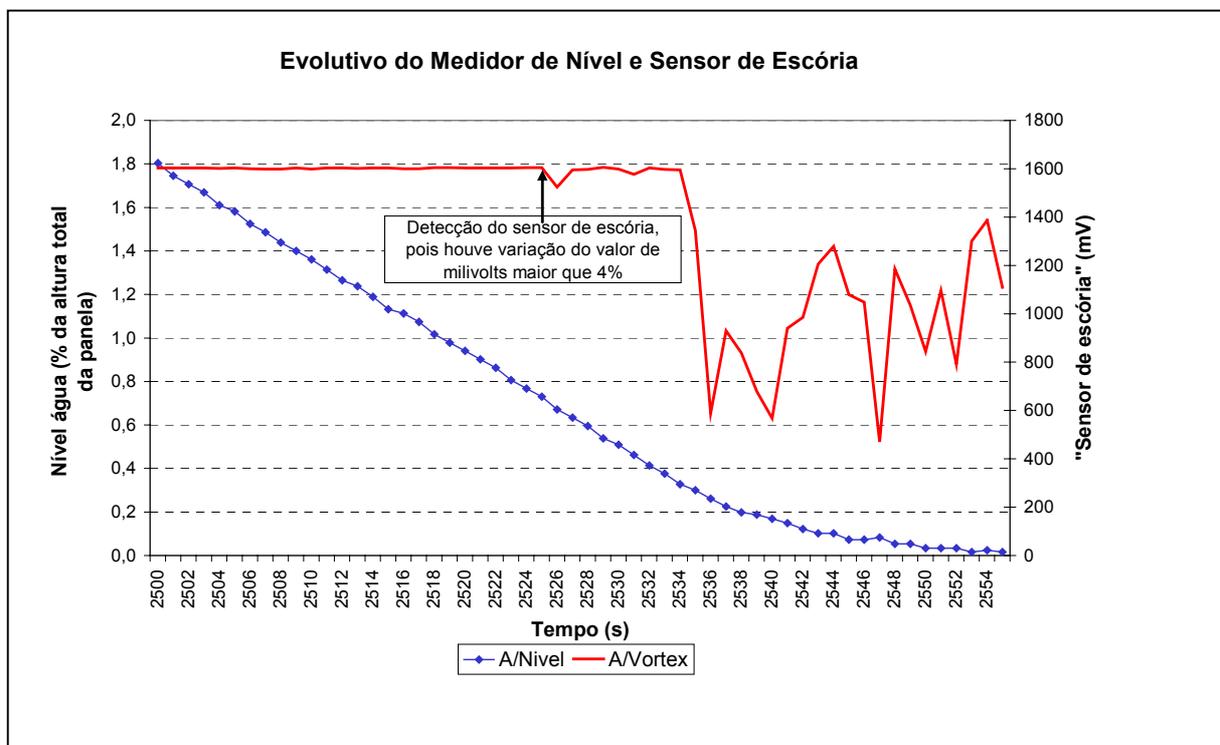


Figura 4: Detalhe do comportamento da voltagem emitida pelo sensor do detector de escória (linha contínua) com a altura de água (linha com pontos).

Outro item interessante sobre o detector de escória é a diferença de leitura quando o experimento era realizado com a presença do óleo de silicone. Visualmente, é possível identificar quando o teste era só com água (diminuição da voltagem) ou com água e óleo de silicone (aumento da voltagem). A Figura 5 ilustra o comportamento característico de testes envolvendo a presença de óleo de silicone, onde a voltagem do detector de escória sempre aumenta quando é percebida a presença do óleo de silicone (linha vermelha contínua).

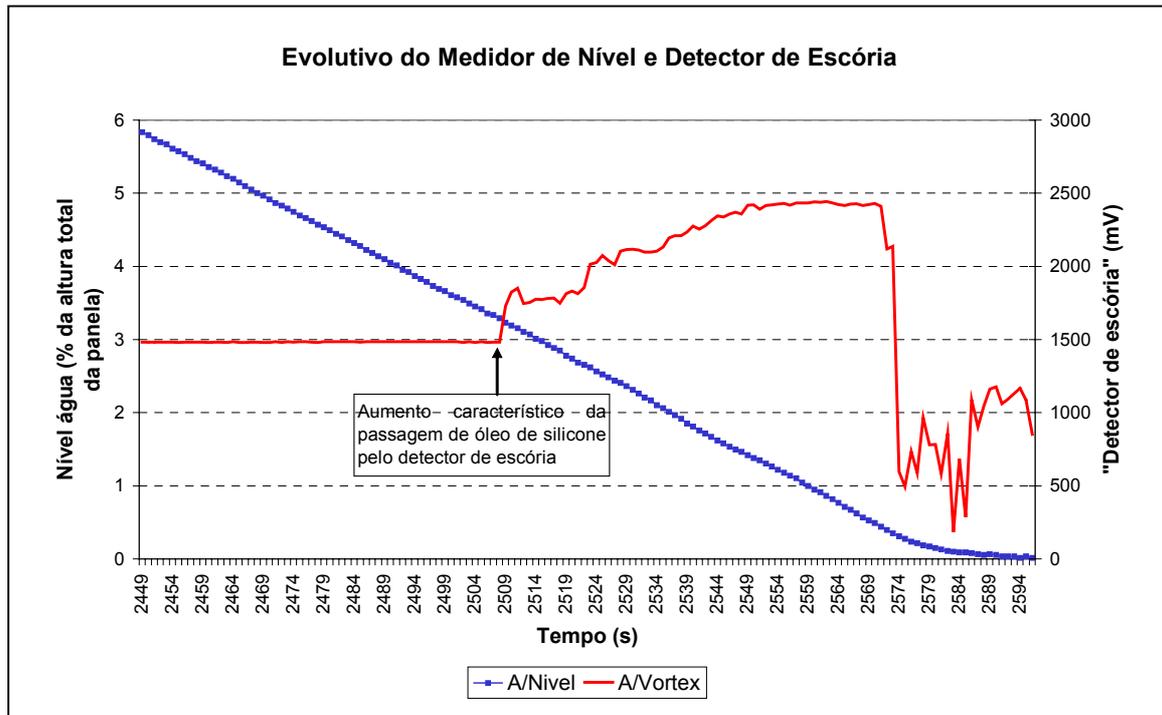


Figura 5: Curva característica para testes com a presença do óleo de silicone.

Assim, o detector de escória demonstrou ser capaz de detectar a presença de outra fase além da água e distinguir se a segunda fase era ar ou óleo de silicone. Outra observação importante é que para todos os testes com óleo de silicone, a passagem de escória pelo sensor se dava a um nível consideravelmente mais alto do que para os testes só com água.

O software Minitab foi utilizado para fazer a análise dos testes que compõem o DOE. A Figura 6 mostra o gráfico de Pareto com os efeitos dos fatores e suas combinações na variável resposta. O nível de significância utilizado foi de 5% ($\alpha = 0,05$), que está associada à probabilidade de uma tomada de decisão errada sobre a hipótese de que não há diferença estatística significativa entre os tratamentos. A linha pontilhada representa o valor da estatística de teste que permite diferenciar os fatores mais significativos (à direita da linha) daqueles que são irrelevantes, ou têm pouca influência na altura de formação do vórtice e arraste de óleo/ar com a água.⁽⁷⁾

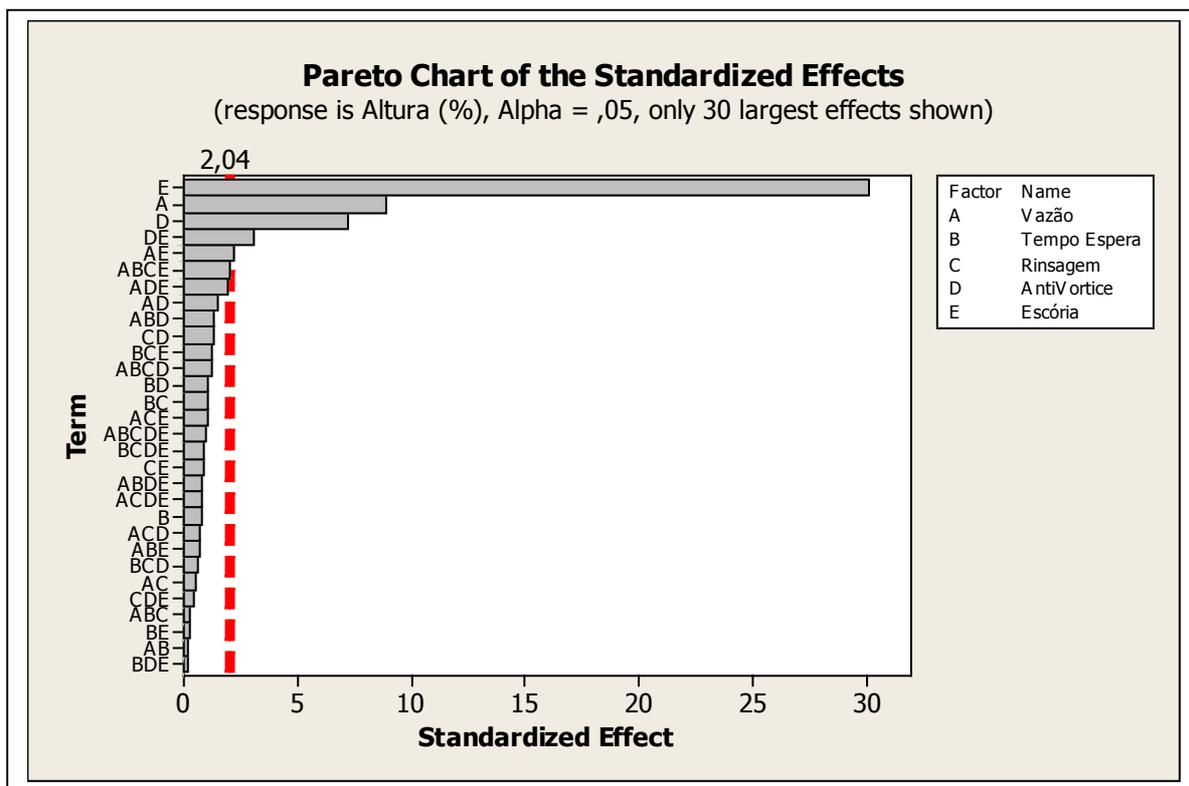


Figura 6: Gráfico de pareto com os fatores e interações significativas.

A Figura 6 mostra que há uma forte influência da presença da escória (barra E), da vazão de saída (barra A) e da presença do dispositivo antivórtice (barra D) na variável resposta altura de água. Além disso, algumas interações de fatores foram significativas (barras DE, AE e ABCE). Neste resultado, chama atenção a interação de quarta ordem ABCE, situação pouco comum na prática. No entanto, deve-se considerar esta interação devido à escolha dos fatores testados (parâmetros mais citados pela literatura técnica) e também ao rigor empregado nos experimentos.

Uma forma de análise dos testes é através da ferramenta Cube Plot (Figura 7), onde em cada quina dos cubos são apresentados os valores médios da altura crítica para cada combinação de níveis e fatores.

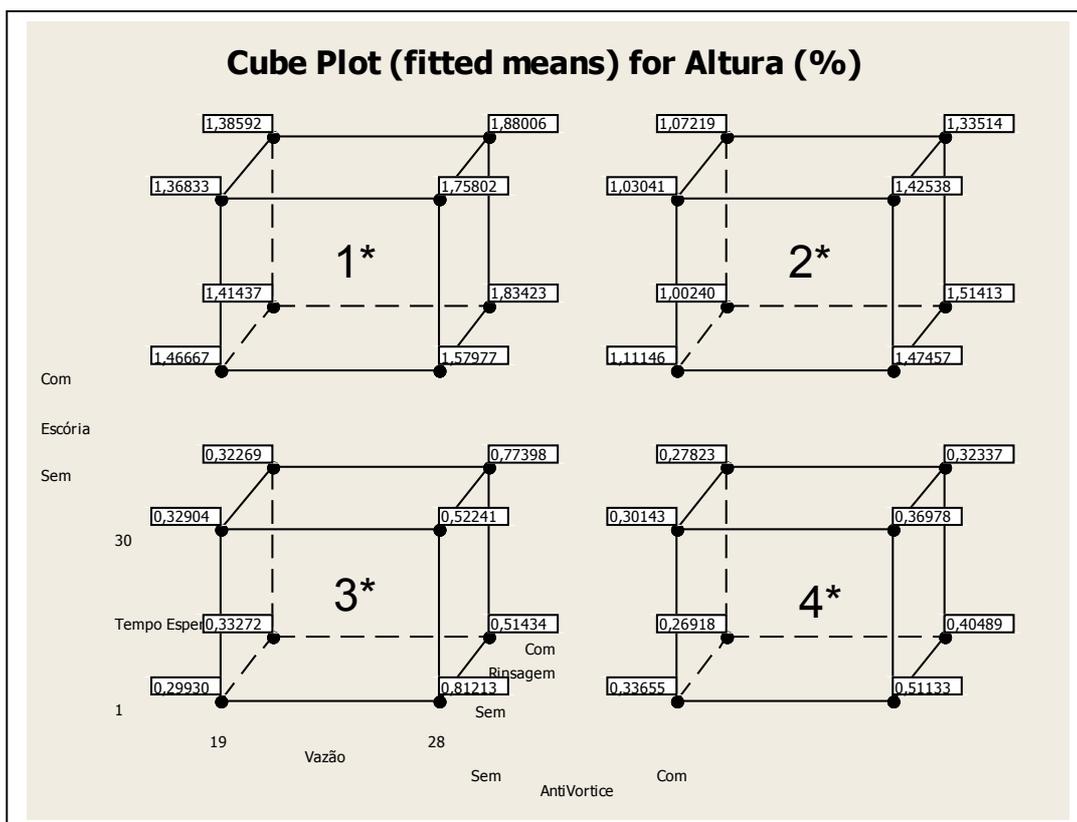


Figura 7: Cube Plot com os valores de altura para os fatores e interações.

Como a variável resposta é a altura crítica, quanto menor for o valor médio, melhor será o resultado. Portanto, o menor valor encontrado foi de 0,26918% (0,3%), localizado no cubo 4. Assim, a melhor condição do experimento foi o teste sem escória, com a presença do dispositivo anti-vórtice, com a vazão de 19 l/min, com o tempo de espera de 1 minuto e com a presença da rinsagem. Desta forma se pode verificar a influência dos fatores e interações, mas como citado anteriormente, é uma avaliação bem complexa. Uma forma de contornar esta análise é através da ferramenta denominada de Response Optimizer, muito útil e adequada para situações como estas.

Para facilitar a avaliação dos resultados, o Response Optimizer apresenta telas amigáveis onde é possível identificar quais são as condições de operação mais adequadas e a situação que satisfaça da melhor maneira possível todas as variáveis simultaneamente.⁽⁷⁾ A Figura 8 mostra a melhor condição obtida para todos os fatores e níveis testados.

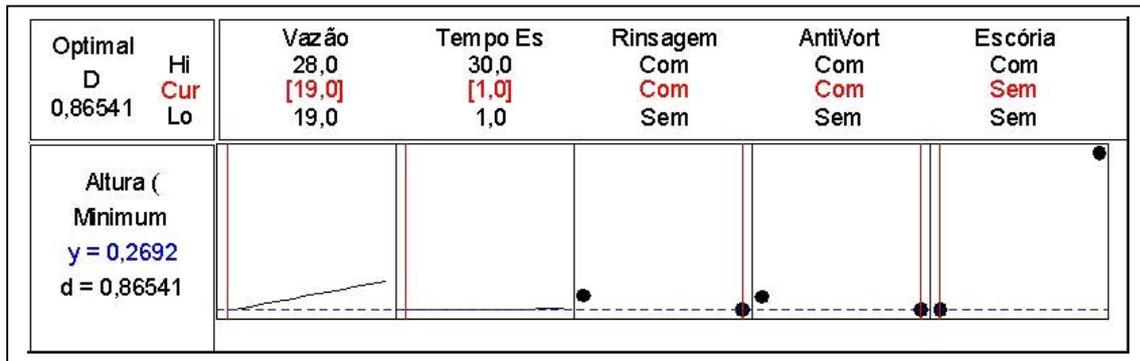


Figura 8: Tela do Response Optimizer com o melhor resultado para altura crítica.

Idêntico ao apresentado anteriormente na análise do Cube Plot, a melhor condição obtida pelo Response Optimizer foi:

- Vazão de 19 l/min;
- Tempo de espera de 1 minuto;
- Uso da rinsagem;
- Uso do dispositivo anti-vórtice; e
- Sem a presença de escória.

Nesta condição, também foi obtida uma altura mínima de 0,2692% ou 3mm.

A grande vantagem da análise através do Response Optimizer é facilidade em se fazer comparações. Na Figura 9, percebe-se que a presença da escória levou a uma grande diferença na altura crítica ($y=1,00\%$ contra $y=0,27\%$), isto é, para testes com o óleo de silicone simulando a escória, a altura de detecção do vórtice foi 372% mais alto do que a condição de testes só com água. Este resultado é muito importante, pois deste modo não se pode comparar testes realizados somente com água com os testes que simularam a presença de escória. O resultado obtido neste DOE está de acordo com o apresentado por Sankaranayan,⁽²⁾ porém não na mesma ordem de grandeza para as diferenças de altura.

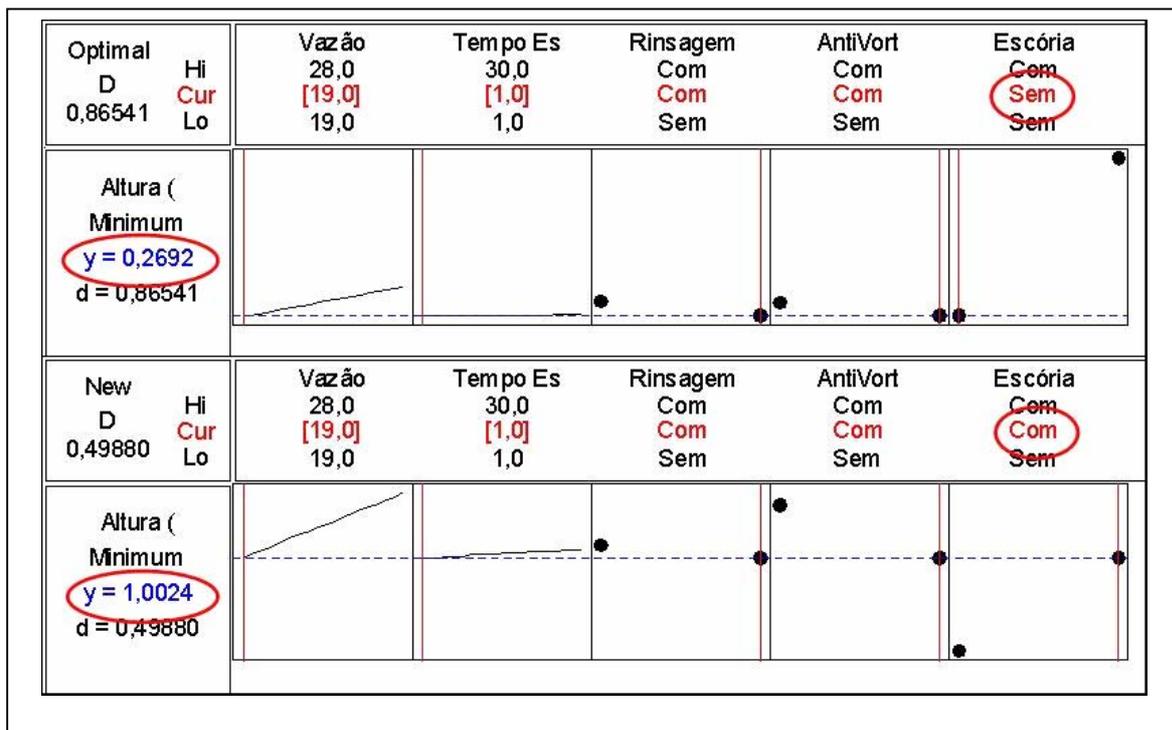


Figura 9: Telas com os resultados comparativos avaliando a escória.

A Tabela 1 mostra uma síntese dos resultados mais importantes evidenciados pelo DOE.

Tabela 1: Alturas obtidas para os principais efeitos.

| Vazão (l/min) | Tempo (min) | Rinsag | AntiVort | Escória | Altura (%) | Altura (mm) | Observação |
|---------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-------------|--|
| 19 | 1 | Com | Com | Sem | 0,3 | 3 | Melhor resultado dos testes |
| 19 | 1 | Com | Com | Com | 1,0 | 12 | Comparativo com e sem escória |
| 19 | 30 | Com | Com | Com | 1,1 | 13 | Efeito do tempo de espera com a presença de escória |
| 19 | 1 | Sem | Com | Com | 1,1 | 13 | Efeito da rinsagem com a presença de escória |
| 19 | 1 | Com | Sem | Com | 1,4 | 17 | Efeito do antivortice com a presença de escória |
| 28 | 1 | Com | Com | Com | 1,5 | 18 | Efeito da vazão com a presença de escória |
| 28 | 30 | Com | Com | Com | 1,3 | 16 | Efeito do tempo de espera com 28 l/min e com a presença de escória |

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram que se tirassem as seguintes conclusões:

-O melhor resultado obtido foi na condição onde a vazão de saída de água era de 19 l/min, com 1 minuto de tempo de espera, com a rinsagem durante o esvaziamento, com a atuação do dispositivo anti-vórtice e sem a presença do óleo de silicone (escória). Neste caso, a passagem de ar pelo orifício de saída foi detectada com uma coluna de água de apenas 3mm;

-Foi verificada uma significativa diferença da altura de formação do vórtice quando se simula o esvaziamento da panela com e sem a presença do óleo de silicone (12mm e 3mm, respectivamente). Este fato é importante, pois deste modo não se pode comparar os resultados dos testes realizados somente com água com os experimentos com a presença de um óleo sobrenadante simulando a escória;

-Analisando os resultados dos testes, mas sempre levando em consideração a presença de escória, os efeitos da vazão e do dispositivo anti-vórtice foram os mais expressivos;

-Quando se compara a vazão de 19 l/min com 28 l/min nas mesmas condições, a altura variou de 1,0% (12mm) para 1,5% (18mm), ou seja, a influência da alteração da vazão levou a formação do vórtice a uma altura 50% maior;

-Analisando a atuação do dispositivo anti-vórtice, foi verificado que o efeito da presença do dispositivo reduziu a altura crítica de 1,4% (17mm) para 1,0% (12mm), uma diferença de quase 40%. O desenho concebido para o teste, onde foi visada uma peça simples e funcional, provou-se eficiente para reduzir a altura de formação do vórtice.

-O estudo do esvaziamento da panela no modelo físico mostrou-se eficaz para identificar os parâmetros mais importantes para minimizar o arraste de ar e/ou óleo de silicone para o orifício de saída da panela.

Agradecimentos

Gostaria de registrar um agradecimento especial à ArcelorMittal Monlevade, representados por Gérson Menezes, Augusto Espeschit, João Garcia, Marco Antônio Bosco, Joaquim Costa, Lucas Penna, Ricardo Botelho, Antonio Martins, Márcio Ramires e Francinélío pelas idéias, suportes elétricos e eletromecânicos, além do apoio à montagem e execução dos testes.

Ao Professor Parreiras da UFMG pelo apoio para conclusão da dissertação de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 HAMMERSCHMID, P.; TACKE, K. H.; POPPER, H.; WEBER, L.; BUBKE, M.; SCHWERDTFEGER, K. Vortex formation during drainage of metallurgical vessels. *Ironmaking and Steelmaking*, Vol 11, Nº 6, p. 332-339, 1984.
- 2 SANKARANARAYANAN, R. Modeling of slag entraining funnel formation ('vortex') during liquid metal transfer operations. Thesis of Doctor of Philosophy. McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 441pages, 1994.
- 3 ANDRZEJEWSKI, P.; DIENER, A.; PLUSCHKELL, W.. Model investigations of slag flow during last stages of ladle teeming. *Steel Research* 58, Nº 12, p. 547-552, 1987.
- 4 KORIA, S. C., KANTH, U.. Model studies of slag carry-over during drainage of metallurgical vessels. *Steel Research* 65, Nº 1, p.8-14, 1994
- 5 PIMENTA, H. M; VALADARES C. A. G; BELLIGOLI G. C. D. Estudo da passagem de escória na etapa de vazamento de aço panela/distribuidor; In: 11º Seminário de aciaria do IAS, 1997, Buenos Aires Argentina. 199-207.
- 6 STEFFEN, R. Fluid flow phenomena of metal and slag during drainage of metallurgical vessels. *Proceedings of the international conference secondary metallurgy*. Aachen, West Germany , Preprints, P97-118.
- 7 DAMASCENO, E. C.. Síntese dos principais tópicos abordados no curso 6σ. Fundação de Desenvolvimento Gerencial - FDG, João Monlevade, Maio 2003.