

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESCÓRIA / AÇO DURANTE O ESGOTAMENTO DA PANELA POR MEIO DE MODELAGEM FÍSICA

César Takaci Sato ¹Márcio Ramires ²Roberto Parreiras Tavares ³

Resumo

Neste estudo, é 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 utilizado um modelo físico da panela da ArcelorMittal Monlevade, na escala 1:3. O estudo mostra que a simulação física do esvaziamento da panela é 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. Conclui-se que há uma diferença significativa entre as alturas críticas quando se simula o esvaziamento da panela com e sem a presença do óleo de silicone (em valores médios, 12 mm e 3 mm, respectivamente). Outros fatores que mostram efeitos significativos sobre a altura crítica são a vazão de saída da panela e a presença do dispositivo anti-vórtice, levando em consideração a presença de óleo de silicone.

Palavras-chave: Escórias; Modelo físico; Painelas.

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 is studied using a physical model of the ladle used at ArcelorMittal Monlevade (1:3 scale). In this model, water is used to simulate liquid steel and silicon oil to simulate slag. A DOE (Design Of Experiments) is implemented and the effects of some factors and levels on vortex formation are 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 is found for the critical height (12 mm and 3 mm). 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 show significant effects from the water flow rate and the presence of anti-vortex device, considering the use of silicon oil.

Key words: Slag; Physical model; Ladle.

I INTRODUÇÃO

A escória é essencial para a produção do aço, protegendo-o contra oxidação 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 sequência. 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 por meio de modelagem física, pois se pode trabalhar em temperatura ambiente e com um baixo custo quando comparado a processos industriais. Especificamente

¹Engenheiro Metalurgista, Aciaria – Lingotamento Contínuo. ArcelorMittal Monlevade. Av. Getúlio Vargas 100, Centro, Cep 35930-395, João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: cesar.sato@arcelormittal.com.br

²Técnico de Instrumentação, Aciaria. ArcelorMittal Monlevade. Av. Getúlio Vargas, 100, Centro, Cep 35930-395, João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: marcio.neves@arcelormittal.com.br

³Professor da Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFGM. Rua Espírito Santo 35, 2º andar, Centro, Cep 30160-030, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: rtavares@demet.ufmg.br

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 antivórtices 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, pretende-se 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 está baseado no projeto industrial visando similaridade geométrica entre as configurações. A Tabela 1 mostra as dimensões das panelas.

A Figura 1 apresenta uma ilustração do esquema de montagem do modelo físico da panela e a Figura 2 mostra a imagem da panela e de alguns instrumentos montados no laboratório de modelagem física da Usina de Monlevade.

Tabela 1. Dimensões da panela real e do modelo

| Dimensões | Diâmetro inferior (mm) | Diâmetro superior (mm) | Altura (mm) |
|------------|------------------------|------------------------|-------------|
| Modelo | 868 | 931 | 1.262 |
| Industrial | 2.604 | 2.793 | 3.786 |

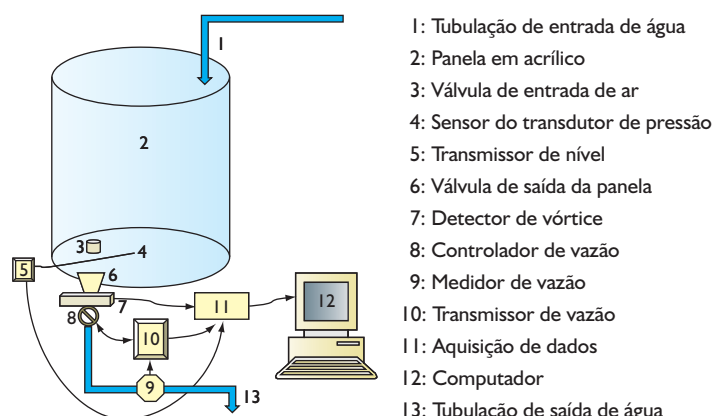


Figura 1. Esquema de montagem do modelo físico da panela.

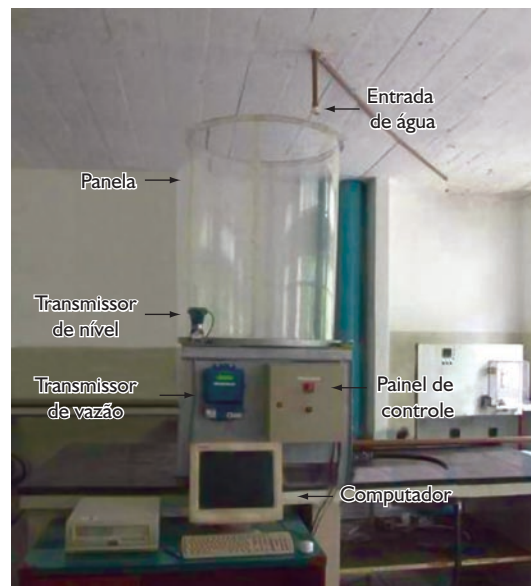


Figura 2. Vista principal do modelo físico da panela.

Para a identificação do vórtice, foi desenvolvido um dispositivo eletrônico que fica localizado logo abaixo da válvula de saída da panela. Este aparelho tem uma fonte emissora de laser em uma extremidade e na outra um receptor. Quando se tem apenas água passando pelo tubo do dispositivo, como ilustrado na Figura 3a, o equipamento apresenta um valor de voltagem, neste exemplo 2.000 mV. Mas a presença de outro fluido diferente da água induz à difração do raio laser, levando o aparelho a apresentar valores diferentes, neste caso 1.500 mV, como ilustrado na Figura 3b, acusando a passagem do fluido sobrenadante, que neste estudo é o ar ou o óleo de silicone ou uma mistura dos dois.

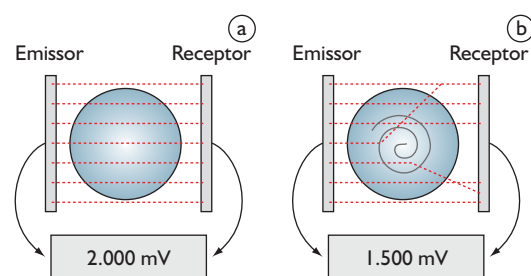


Figura 3. Ilustração do funcionamento do detector de vórtice.

2.2 Metodologia

Para simular a intensidade da emulsificação óleo de silicone/água, foi utilizada a ferramenta DOE (*Design Of Experiments*), também conhecida como PDE (*Planejamento De Experimentos*) 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 antivórtice (sem ou com presença do dispositivo anti-vórtice); e
- fluido sobrenadante (sem ou com presença de óleo de silicone de 50 cst).

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, foi utilizada água à temperatura ambiente 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 1.036 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 antivórtice e/ou o óleo de silicone (equivalente à espessura de 2 cm e viscosidade de 50 cst 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 2 m/min e 3 m/min de velocidade de lingotamento, respectivamente).

Ao longo dos experimentos, o dispositivo Datataker 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.

A configuração do dispositivo antivórtice 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 à de um disco sobrenadante, com diâmetro (d) de 230 mm e altura (h) de 40 mm. Além disso, a citação de Steffen,⁽⁶⁾ onde válvulas tampões tendem a minimizar a formação de vórtice, também favoreceu o projeto do dispositivo. A Figura 4 ilustra o formato do disco utilizado como um dispositivo antivórtice.

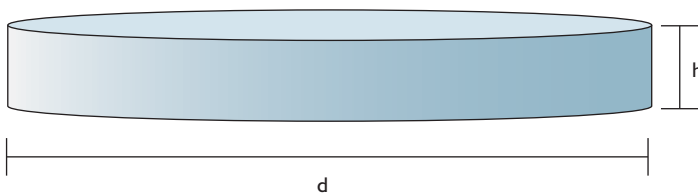


Figura 4. Ilustração do disco sobrenadante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada teste, onde os parâmetros de interesse foram selecionados de acordo com o planejamento de experimentos, 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), adota-se o valor de 4% de variação, isto é, caso a diferença de tensão (tensão) a cada segundo é maior que 4%, considera-se que há uma passagem significativa de ar ou óleo de silicone junto com a água. A Figura 5 ilustra o comportamento do detector de escória e a altura de água dentro da panela ao longo do tempo.

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 6 ilustra o comportamento característico de testes envolvendo a presença de óleo de silicone, onde a tensão sempre aumenta (linha vermelha contínua).

Assim, o detector de escória demonstra ser capaz de detectar a presença de outra fase além da água e distinguir se a segunda fase é ar ou óleo de silicone.

O software Minitab foi utilizado para fazer a análise dos testes que compõem o DOE. A Figura 7 mostra o gráfico de Pareto com os efeitos dos fatores e suas combinações na variável resposta. 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⁾

A Figura 7 mostra que há uma forte influência da presença da escória (E), da vazão de saída (A) e da presença do dispositivo antivórtice (D) na variável resposta altura de água. Além disso, algumas interações de fatores foram significativas (barras DE, AE e ABCE).

Uma forma de análise dos testes é pelo emprego da ferramenta denominada de *Response Optimizer*, que 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 grande vantagem dessa

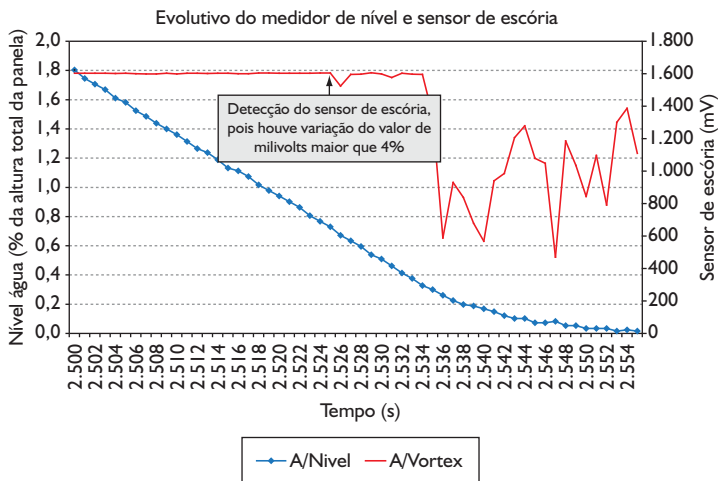


Figura 5. Detalhe do comportamento da voltagem emitida pelo sensor do detector de escória (linha contínua) com a altura de água (linha com pontos).

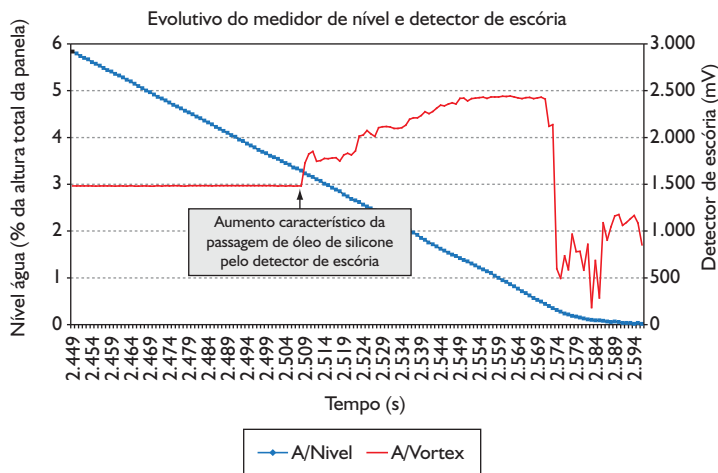


Figura 6. Curva característica para testes com a presença do óleo de silicone.

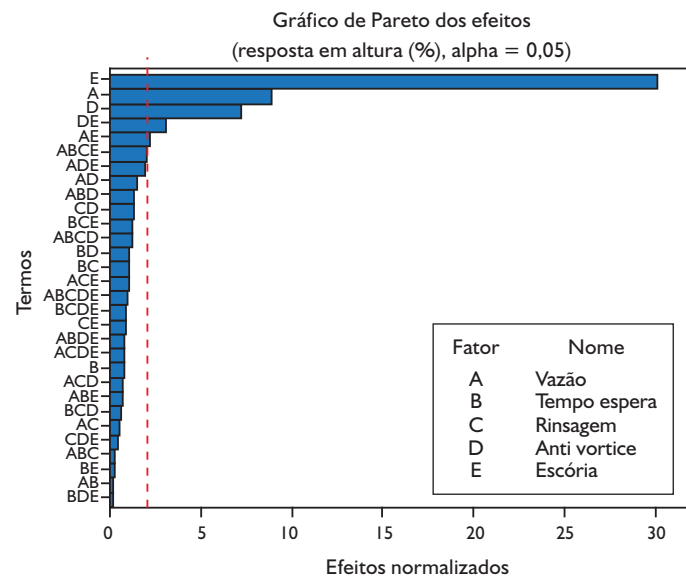


Figura 7. Gráfico de Pareto com os fatores e interações significativas.

ferramenta é a facilidade em se fazer comparações, onde basta movimentar o cursor (linha vermelha) no nível e fator de interesse para avaliar o impacto desta combinação na variável de interesse (y). A Figura 8 mostra a melhor condição obtida para todos os fatores e níveis testados.

| Optimal HI | Vazão | Tempo Es | Rinsagem | AntiVort | Escória |
|------------|--------|----------|----------|----------|---------|
| D | 28,0 | 30,0 | Com | Com | Com |
| Cur | [19,0] | [1,0] | Com | Com | Sem |
| 0,86541 | Lo | 19,0 | 1,0 | Sem | Sem |

| Altura Minimum | Vazão | Tempo Es | Rinsagem | AntiVort | Escória |
|----------------|-------|----------|----------|----------|---------|
| y = 0,2692 | | | | | |
| d = 0,86541 | | | | | |

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

Portanto, a melhor condição obtida pelo *Response Optimizer* foi para uma vazão de 19 L/min; tempo de espera de 1 minuto; uso da rinsagem; uso do dispositivo antivórtice; e sem a presença de escória. Nesta condição, é obtida uma altura mínima de 0,2692% ou 3 mm (repare na Figura 8 que o cursor do fator “Escória” está à esquerda, indicando “Sem”). Alterando o cursor do fator “Escória” para a direita, obtém-se agora a condição em que se tem a presença de escória (“Com”), e a altura crítica y é de 1,0024%, conforme pode ser visualizado na Figura 9. Desta forma, pode-se avaliar o impacto do fator escória na altura crítica. Portanto para os testes utilizando o óleo de silicone simulando a escória (“Com” e $y=1,0024$), a altura de detecção do vórtice é 372% mais alto do que a condição de testes só com água (“Sem” e $y=0,2692$). 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.

Da mesma forma foi realizada a comparação para os demais fatores significativos, onde pode ser estruturada uma tabela resumo com os resultados obtidos (Tabela 2).

| New HI | Vazão | Tempo Es | Rinsagem | AntiVort | Escória |
|---------|--------|----------|----------|----------|---------|
| D | 28,0 | 30,0 | Com | Com | Com |
| Cur | [19,0] | [1,0] | Com | Com | Com |
| 0,49880 | Lo | 19,0 | 1,0 | Sem | Sem |

| Altura Minimum | Vazão | Tempo Es | Rinsagem | AntiVort | Escória |
|----------------|-------|----------|----------|----------|---------|
| y = 1,0024 | | | | | |
| d = 0,49880 | | | | | |

Figura 9. Tela com o resultado comparativo avaliando a escória.

Tabela 2. Principais resultados para combinações de níveis e fatores

| 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 | 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 |

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem que se tirem as seguintes conclusões:

- é 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 (12 mm e 3 mm, respectivamente). Este fato é importante, pois deste modo não se podem 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 antivórtice foram os mais expressivos;

REFERÊNCIAS

- 1 HAMMERSCHMID, P.; TACKE, K. H.; POPPER, H.; WEBER, L.; BUBKE, M.; SCHWERTDFEGER, K. Vortex formation during drainage of metallurgical vessels. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 11, n. 6, p. 332-39, Aug. 1984.
- 2 SANKARANARAYANAN, R. **Modeling of slag entraining funnel formation ('vortex') during liquid metal transfer operations**. 1994. 441 p. Thesis (Doctor of Philosophy) – McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 1994.
- 3 ANDRZEJEWSKI, P.; DIENER, A.; PLUSCHKELL, W. Model investigations of slag flow during last stages of ladle teeming. **Steel Research**, v. 58, n. 12, p. 547-52, 1987.
- 4 KORJA, S.C.; KANTH, U. Model studies of slag carry-over during drainage of metallurgical vessels. **Steel Research**, v. 65, n. 1, p. 8-14, Jan. 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, 11, 1997, Buenos Aires, Argentina. Buenos Aires; IAS, 1997. p. 199-207.
- 6 STEFFEN, R. Fluid flow phenomena of metal and slag during drainage of metallurgical vessels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SECONDARY METALLURGY, 1987, Aachen, West Germany. **Proceedings**. [S.L.: s.n.], 1987. p. 97-118.
- 7 DAMASCENO, E.C. Síntese dos principais tópicos abordados no curso. [6º Curso do Programa Seis Sigma – Fundação de Desenvolvimento Gerencial – FDG]. João Monlevade, 2003.

Recebido em: 27/11/2008

Aprovado em: 30/04/2009

Proveniente de: SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL, 39., 2008, Curitiba, PR. São Paulo: ABM, 2008.

- quando se compara a vazão de 19 L/min com 28 L/min nas mesmas condições, a altura variou de 1,0% (12 mm) para 1,5% (18 mm), ou seja, a influência da alteração da vazão levou a formação do vórtice a uma altura 50% maior;
- analisando a atuação do dispositivo antivórtice, é verificado que o efeito da presença do dispositivo reduz a altura crítica de 1,4% (17 mm) para 1,0% (12 mm), uma diferença de quase 40%. O desenho concebido para o teste, onde foi visada uma peça simples e funcional, prova-se eficiente para reduzir a altura de formação do vórtice; e
- o estudo do esvaziamento da panela no modelo físico mostra-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

Registre-se 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.