

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA VÁLVULA SUBMERSA NO ESCOAMENTO DO AÇO NO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS*

Rodrigo Madrona Dias¹
Roberto Parreiras Tavares²
Leonardo José Silva de Oliveira³
Rodrigo Seara Martins⁴

Resumo

A velocidade superficial e o padrão de escoamento no molde de lingotamento contínuo, principalmente na região do menisco, são parâmetros importantes que têm efeito sobre a qualidade do produto final. Essas características do escoamento são afetadas por muitos parâmetros e variáveis operacionais, tais como: largura e espessura do molde, velocidade de lingotamento, vazão de argônio, geometria da válvula submersa, profundidade da válvula submersa, etc. No presente trabalho foram analisados os efeitos do formato e do ângulo da porta de saída da válvula submersa sobre o escoamento do aço no molde de lingotamento contínuo. O padrão de escoamento do aço no interior do molde é algo difícil de determinar experimentalmente. Nesse trabalho foi utilizada a técnica experimental de *nail board*, que permite fornecer informações de direção e velocidade do fluido na região do menisco. No estudo foi possível identificar diferenças na velocidade superficial e no padrão de escoamento para cada geometria de válvula testada, fornecendo subsídios para possíveis alterações nas condições de processo para melhoria do escoamento e conseqüentemente da qualidade final dos produtos.

Palavras-chave: Escoamento; Válvula Submersa; *Nail Board*; Lingotamento Contínuo.

INFLUENCE OF SUBMERGED ENTRY NOZZLE GEOMETRY ON THE STEEL FLOW IN THE MOLD OF A CONTINUOUS SLAB CASTER

Abstract

The surface velocity and steel flow pattern in a continuous cast mold, especially in the meniscus region, are important parameters that have an effect on the quality of the final product. These flow characteristics are affected by many parameters and operational variables, such as: mold width and thickness, casting speed, argon flow rate, submerged entry nozzle geometry, submerged entry nozzle depth, etc. In the present work, the effects of shape and angle of submerged entry nozzle outlet port on the steel flow in a continuous caster mold were analyzed. The pattern of steel flow inside the mold is somewhat difficult to determine experimentally. In the present work the experimental technique of nail board was used, which is able to provide information about direction and fluid velocity in the meniscus region. In the study, it was possible to identify differences in surface velocity and flow pattern for each submerged entry nozzle geometry tested, thus indicating possible changes in the process conditions to improve the flow and consequently the final quality of the products.

Keywords: Steel Flow, Submerged Entry Nozzle, Nail Board; Continuous Casting.

¹ Engenheiro Metalurgista, CQE/ASQ, Engenheiro de Produção Sênior, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, PhD, Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Membro da ABM, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia Extrativa, Pesquisador Especialista, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos, Usiminas, Membro da ABM, Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Pós-Graduação em Metalurgia, Engenheiro de Produção Pleno, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de placa produzida via lingotamento contínuo é altamente afetada pelas condições de escoamento do aço no interior do molde, principalmente na região superior do menisco, onde a pele solidificada é muito fina. A fonte mais comum de defeitos superficiais é a captura de partículas na região do menisco. Tais partículas podem ser provenientes de diversas fontes, incluindo: bolhas de argônio, inclusões de óxidos provenientes de processos anteriores e o arraste e aprisionamento de escória de pó fluxante. Tais partículas aprisionadas podem causar defeitos superficiais no produto final laminado. Na figura 1(a) apresenta-se um exemplo de defeito causado por inclusões de pó fluxante em produto laminado.

Outros problemas incluem marcas de oscilação profundas e depressões superficiais, que reduzem a transferência de calor local, causando uma elevação da temperatura da pele neste ponto, levando, conseqüentemente, a uma concentração de tensão e à formação de trincas. Trincas longitudinais são exemplos de defeitos que geralmente se iniciam em pontos quentes na região do menisco. A figura 1(b) mostra um exemplo de trinca longitudinal em placa. Todos esses defeitos são agravados por grandes flutuações de nível de aço no molde, que por sua vez dependem do padrão de escoamento do aço na região do menisco.



Figura 1 – Defeitos superficiais - (a). Produto laminado com a presença de defeito associado à inclusão de pó fluxante. (Oliveira [1]); (b) Trinca Longitudinal em placa. (Oliveira [2]).

Diferentes padrões de escoamento podem ser obtidos dependendo das condições de lingotamento, conforme visto na figura 2. Dauby [3] pontua que o padrão de fluxo ideal é o padrão do tipo *double roll*, por ter renovação do menisco e ao mesmo tempo menor turbulência. O padrão do tipo Instável tem maior probabilidade de incorporação de inclusões e, conseqüentemente, formação de defeitos no produto final.

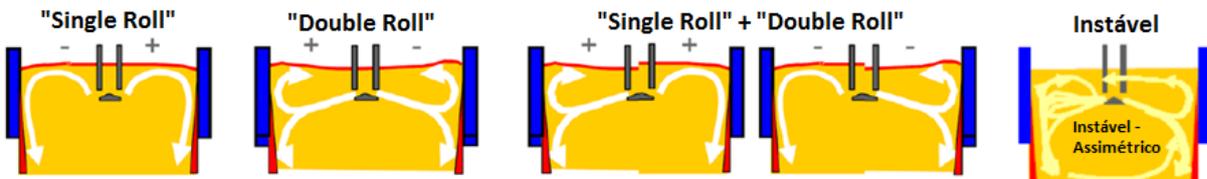


Figura 2 – Tipos de padrão de escoamento no molde. (Domgin, Djuren e Asselborn [4]).

O escoamento do aço na região do menisco pode ser controlado por muitos parâmetros e condições operacionais (dimensões do molde, velocidade de

lingotamento, geometria da válvula submersa, injeção de argônio e profundidade da válvula submersa, dentre outros). Thomas [5] relata que uma das variáveis mais importantes, que altera significativamente o escoamento do aço na região do menisco, é a configuração da válvula submersa, ou seja, sua profundidade de imersão, ângulo, altura, espessura e formato da porta de saída. Na figura 2 são mostradas essas e outras variáveis em desenho esquemático do molde.

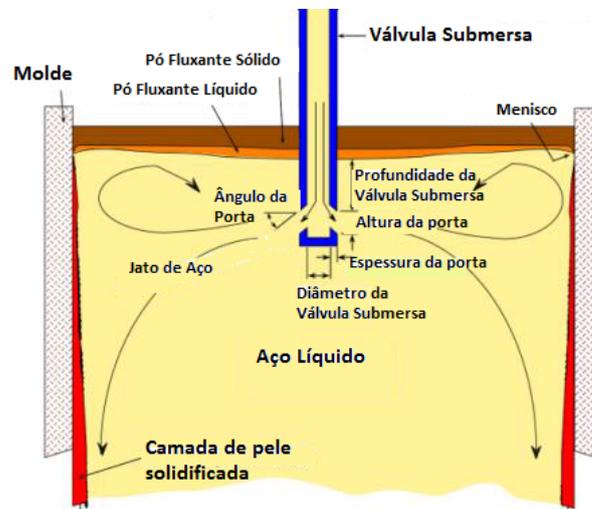


Figura 3 – Visão esquemática do molde de lingotamento contínuo com a válvula submersa e variáveis que podem afetar a condição de escoamento. (Liu [6]).

Portanto, para uma dada situação de trabalho desejada (velocidade de lingotamento, largura e espessura do molde e vazão de argônio), a geometria da válvula submersa pode ser ajustada para definição do padrão de escoamento ideal na região do menisco.

Um fator muito relevante que afeta a condição de escoamento e, conseqüentemente, a qualidade final do produto é a velocidade superficial na região do menisco. Thomas et al. [7] enfatizam que alta velocidade superficial eleva o nível de turbulência provocando instabilidade no fluxo, aumentando assim a possibilidade de arraste de escória, inclusões e bolhas. Por outro lado, velocidades superficiais muito reduzidas podem resultar em menor transferência de calor na região do menisco, o que leva à formação de ganchos subsuperficiais e marcas de oscilação mais profundas, gerando defeitos superficiais na placa. Portanto, é muito importante que se conheça a velocidade superficial na região do menisco para cada condição de processo.

Muitos métodos têm sido desenvolvidos para medir a velocidade do aço na região no menisco, tais como *karman vortex probe*, *mass flow control (MFC)*, método da inclinação, *sub-meniscus velocity control (SVC)*, *nail board*, etc. Rietow e Thomas [8] mostraram que a técnica de medição por *nail board* é um método simples e que fornece boa estimativa de velocidade superficial em diversos pontos na região do menisco. Com esse método, pode-se obter registros conforme figura 4, no qual é possível identificar a velocidade e o padrão de fluxo na região do menisco entre a válvula submersa e a face estreita (FE).

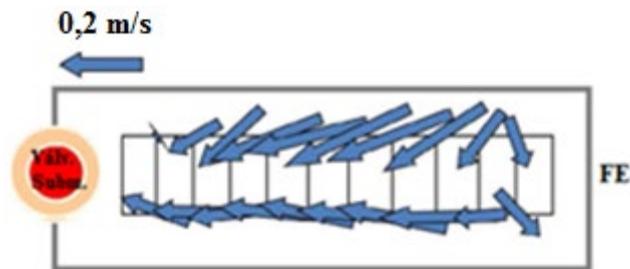


Figura 4 - Perfil de velocidade e escoamento. (Cho, Kim e Thomas [9]).

Em linhas gerais, a complexidade de se estimar e entender o padrão de escoamento do aço no molde e a sua correlação com a qualidade superficial sugere que trabalhos devem ser realizados buscando a melhor condição fluidodinâmica no molde.

Neste trabalho, o objetivo foi avaliar a influência direta da geometria da válvula submersa (formato e ângulo da porta de saída) no padrão de escoamento na região do menisco, permitindo assim identificar qual é a melhor configuração de válvula para as condições testadas e propor alterações no processo em busca do melhor padrão de escoamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse estudo, foi avaliado o padrão de escoamento na região do menisco, para três condições diferentes de válvula submersa:

- Porta de saída redonda e ângulo da porta de saída de -25° ;
- Porta de saída redonda e ângulo da porta de saída de -15° ;
- Porta de saída oval e ângulo da porta de saída de -15° .

Na figura 5 é demonstrado um desenho esquemático de válvula submersa com porta de saída redonda e ângulo da porta de saída de -25° .

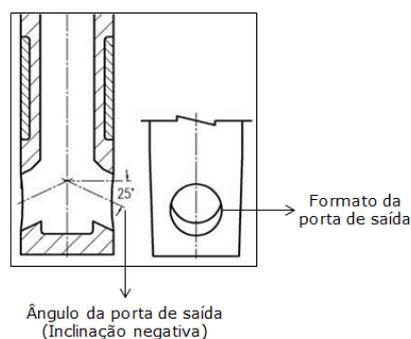


Figura 5 – Desenho esquemático da porta de saída da válvula submersa.

Para melhor avaliação do efeito da geometria da válvula submersa, outros parâmetros, foram mantidos semelhantes, como: largura e espessura do molde; vazão de argônio na válvula interna; pó fluxante; tipo de aço e profundidade de válvula submersa. O cálculo de fração volumétrica de argônio foi realizado conforme equação 1 [10]:

$$f_g = \frac{\beta Q_g}{\beta Q_g + Q_f} \quad (1)$$

Sendo Q_g a taxa de injeção de gás a 25°C e 1 atm, Q_f a vazão volumétrica do aço líquido (obtida multiplicando a velocidade de lingotamento pela seção transversal do veio) e β o fator de expansão do volume de gás. Bai, apud Thomas [10], salienta que o gás expande a altas temperaturas, sendo necessário levar em consideração o fator de expansão β . Portanto, conforme estudos do autor, foi considerado para efeito de cálculos neste trabalho um fator de expansão igual a 5 vezes o volume do argônio frio.

O método experimental utilizado para avaliação da velocidade superficial e o padrão de escoamento na região do menisco foi o método denominado *nail board*, o qual será detalhado a seguir.

2.1 Método *nail board*

O método *nail board* consiste em inserir na parte superior do molde duas fileiras de pregos de aço fixados em uma base de madeira ou aço, conforme visto na figura 6. Para as condições testadas, foram confeccionadas tábuas com duas fileiras totalizando 13 pregos, equidistantes entre si.

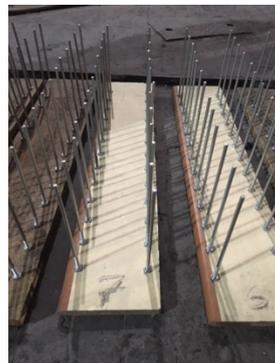


Figura 6 – Disposição dos pregos em tábuas de madeira.

Rietow e Thomas [8] abordam que tempo de imersão em excesso pode causar fusão dessa camada solidificada formada no prego ou causar solidificação da superfície do aço no molde.

Os pregos foram imersos no banho ao lado da válvula submersa, entre as faces largas, durante aproximadamente 3 segundos, para formação de uma camada solidificada no prego. Na figura 7 são demonstrados os passos realizados para o ensaio.

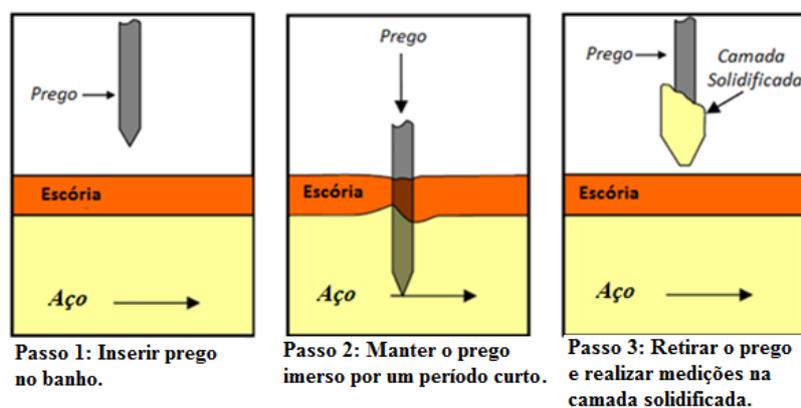


Figura 7 – Passo a passo da medição por *Nail Board*. (Rietow e Thomas [8]).

O formato da camada solidificada em cada prego traz informações importantes para entendimento do padrão de escoamento e da velocidade superficial. O ângulo indicado pela protuberância (*knob*) formada no prego indica a direção do escoamento naquele instante e a diferença entre a maior e menor altura desta protuberância (Δh), assim como o diâmetro desta camada solidificada, traz a informação essencial para o cálculo da velocidade superficial. Na figura 8 é mostrado como são observados e medidos esses valores de Δh .

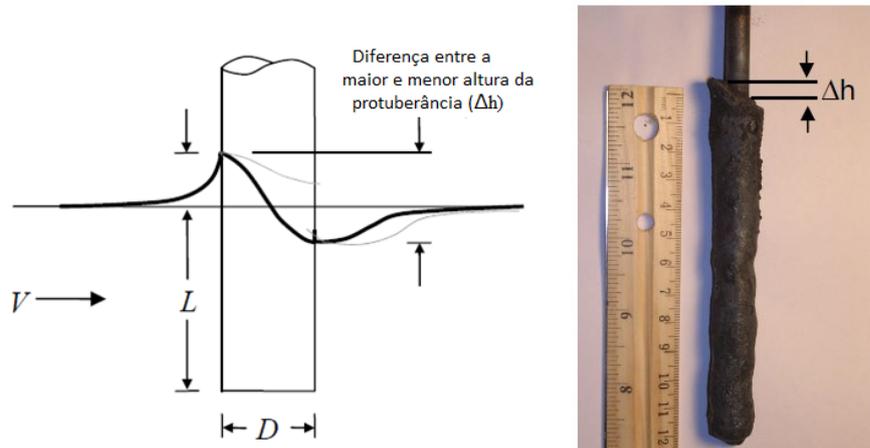


Figura 8 – Visão esquemática da obtenção e medição de Δh em cada prego ensaiado. (Rietow e Thomas [8]).

Uma vez conhecido o diâmetro (ϕ) e Δh de cada prego, a velocidade na região do menisco pode ser mensurada pela equação 2, proposta por LIU et al. [11].

$$V_m = 0,624 \cdot \phi_{cam.solidif.}^{-0,696} \cdot \Delta h^{0,567} \quad (2)$$

Dessa forma, para cada prego, foi estimada a velocidade superficial e, além disto, a direção e sentido do escoamento em cada região. Foram ensaiados, para cada configuração de válvula submersa, 9 “boards” com 26 pregos cada um. Os “boards” foram configurados e enumerados conforme figura 9, identificando face estreita (FE) e válvula submersa (VS).

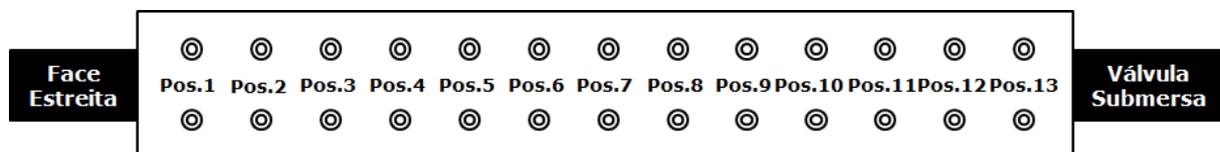


Figura 9 – Esquema e organização de cada “Board”.

Foram realizados os ensaios variando a geometria da válvula submersa, mantendo as demais variáveis constantes, conforme indicado na tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis operacionais dos testes realizados.

Teste	Tipo de Válvula Submersa	Profundidade de Imersão (mm)	Espessura do Molde (mm)	Largura do Molde (mm)	Tipo de Aço	Velocidade de Lingotamento (m/min)	Vazão de argônio (NL/min)	Fração Volumétrica de Argônio (%)
Teste 1	Redonda (-15°)	153	252	1850	Peritético	0,8	3,4	4,36
Teste 2	Oval (-15°)	151	252	1900	Peritético	0,8	3,5	4,37
Teste 3	Redonda (-25°)	150	252	1850	Peritético	0,8	3,4	4,36

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nota-se pela tabela 1 que o padrão de lingotamento para os três testes de fato foram muito semelhantes, haja vista que a fração volumétrica de argônio apresentou valores semelhantes.

Para as válvulas oval (-15°) e redonda (-25°), um dos *boards* apresentou falha, sendo necessário descartá-los. Portanto, para essas duas configurações, foram mensurados resultados de 8 *boards*.

Na figura 10 são mostradas as velocidades médias obtidas para cada válvula e em cada posição dos *boards*.

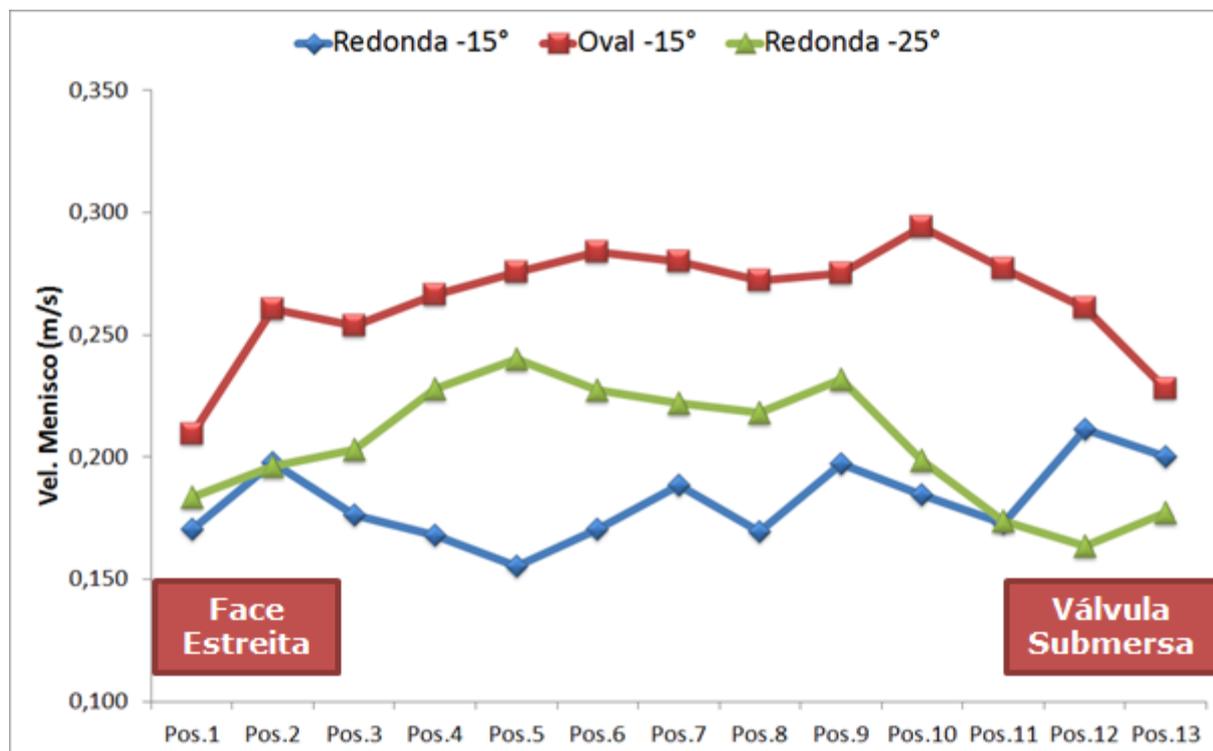


Figura 10 – Velocidade média por tipo de válvula submersa e posição.

Do ponto de vista de velocidade média obtida em todos os *boards*, separando por posição, observa-se que a válvula de saída oval apresentou maior valor, sendo a válvula redonda com inclinação de -15° a que apresentou menor velocidade média.

A válvula de saída oval apresentou maior velocidade em todas as posições do molde, sendo mais baixas na face estreita e próximo à válvula submersa. Isso pode ser explicado pelo fato da válvula de porta de saída oval ter área transversal aproximadamente 23% menor que as demais, fazendo com que o fluido saia da válvula com velocidade maior.

Ao comparar as duas válvulas circulares, a válvula com inclinação mais negativa (-25°) apresentou maior velocidade média, principalmente no centro do molde, sendo esta uma característica típica de um escoamento *double roll*. A válvula de saída redonda com inclinação de -15° apresentou velocidades relativamente baixas, sendo pouco mais elevadas próximo à válvula submersa, indicando uma instabilidade nessa região.

Outra forma de visualizar e discutir melhor os resultados são por meio de croquis de cada *board*, nos quais consta a velocidade em cada região e o direcionamento do escoamento. Nas figuras 11, 12 e 13 são ilustrados os resultados de cada *board* para as válvulas de saída oval (-15°), circular (-25°) e circular (-15°), respectivamente. Vale ressaltar que alguns pregos estavam com camada solidificada muito irregular ou com diferença de altura desprezível, o que impossibilitou a medição, sendo desconsiderados.

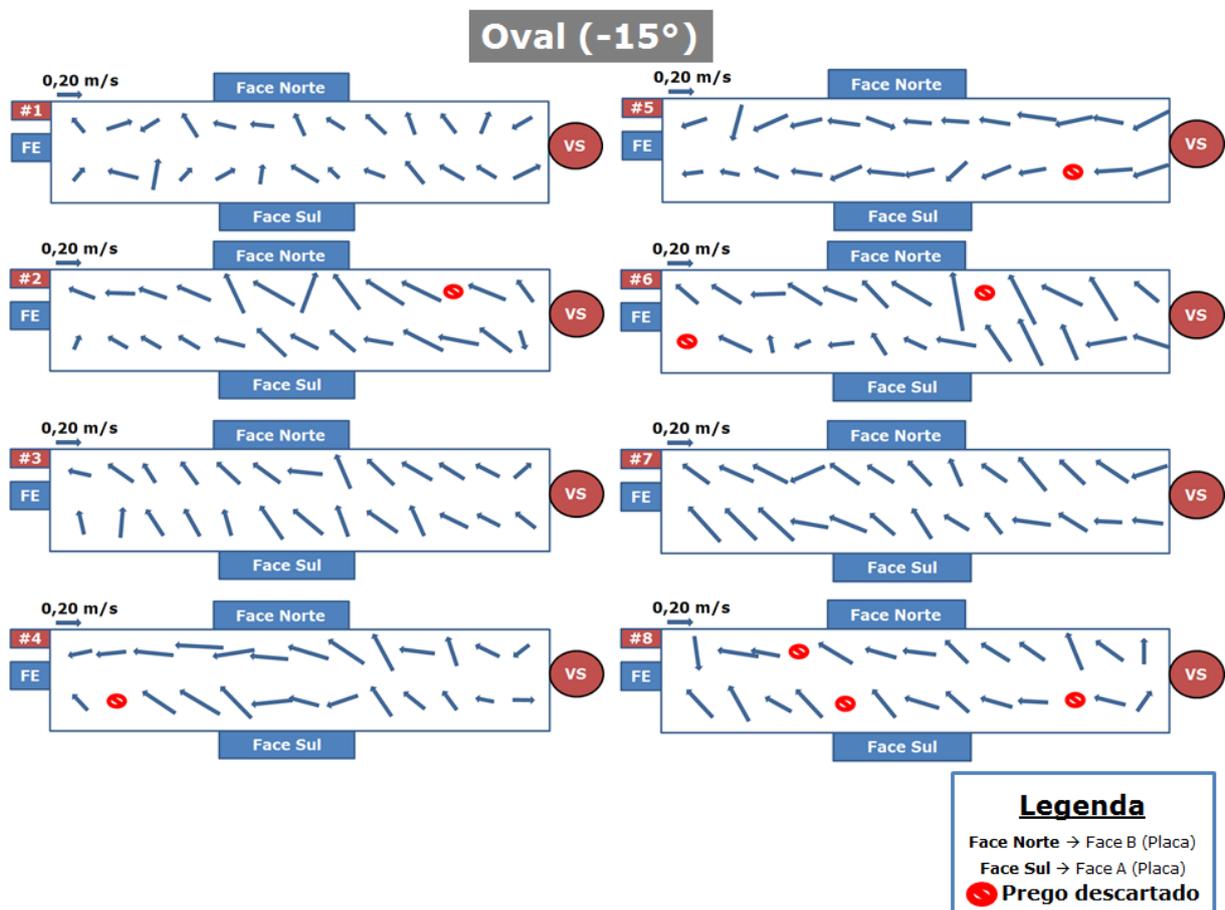


Figura 11 – Direção e velocidade – Válvula com saída oval e ângulo de -15°.

Avaliando os croquis da válvula oval, nota-se que não há muitas divergências entre os *boards* e o escoamento está totalmente direcionado à face estreita, ou seja, padrão de escoamento típico de *single roll*. Esses resultados estão em acordo com a literatura. Dauby [3] salienta que o padrão *single roll* (SR) é favorecido em larguras de molde mais elevadas e menor velocidade de lingotamento, ou baixa profundidade aliada à baixa velocidade de lingotamento.

Circular (-25°)

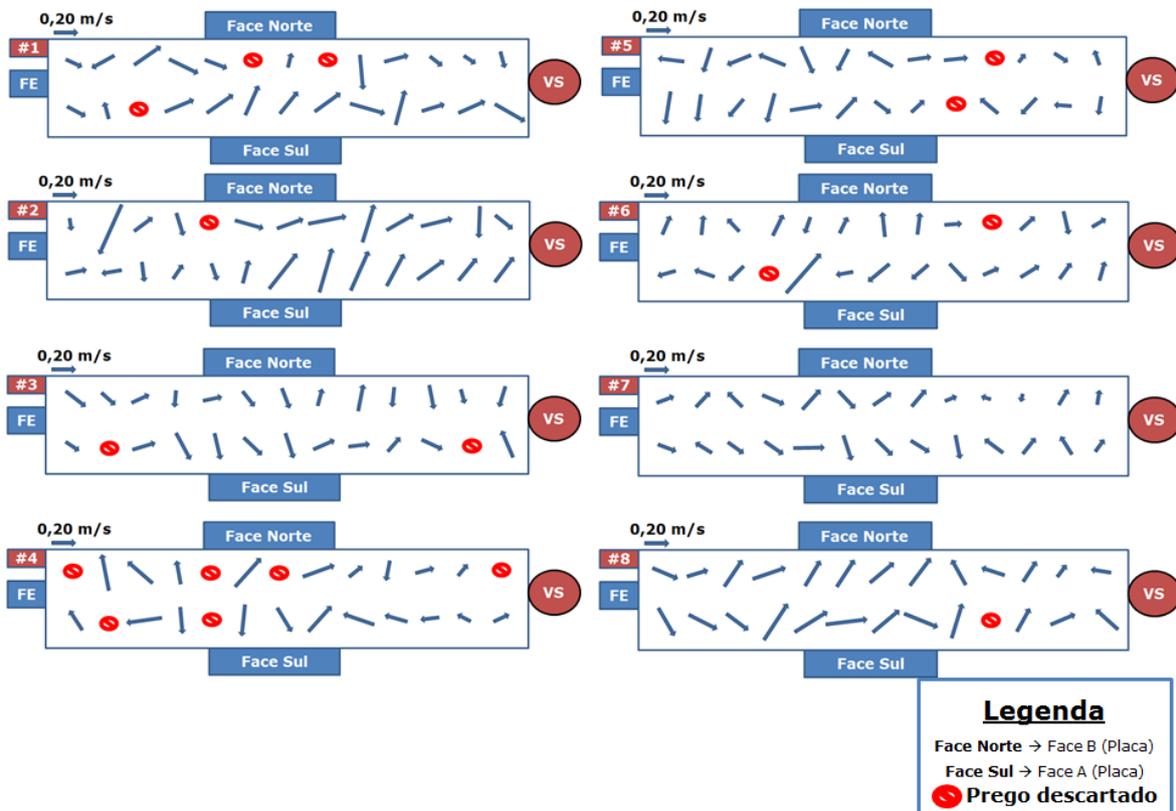


Figura 12 – Direção e velocidade – Válvula com saída circular e ângulo de -25°.

Circular (-15°)

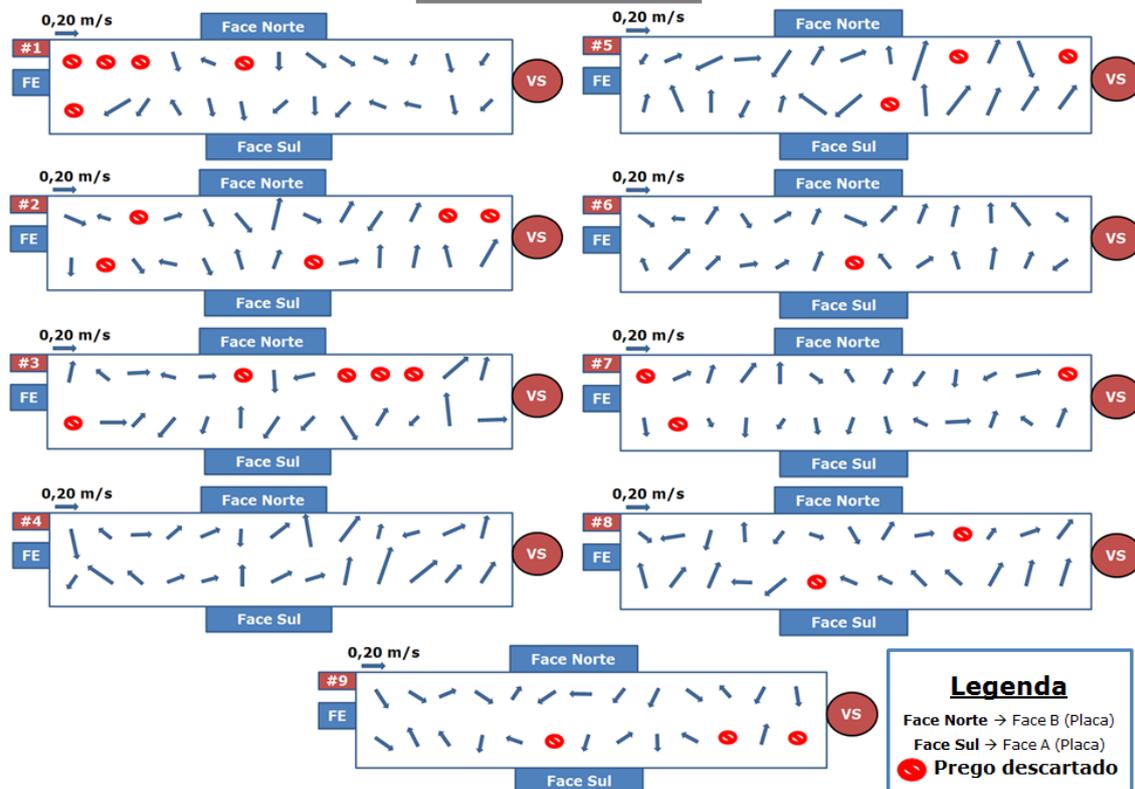


Figura 13 – Direção e velocidade – Válvula com saída circular e ângulo de -15°.

As válvulas de saída circular apresentaram escoamentos mais instáveis e com menor velocidade superficial, sendo que a válvula de -15° demonstrou um pouco mais de instabilidade e menor velocidade.

O padrão de escoamento da válvula circular de -25° se alternou entre instável e *double roll*. Nota-se que os *boards* 1, 2 e 8 se assemelham a um padrão de escoamento *double roll*, uma vez que o escoamento está em direção à válvula submersa. A válvula circular de -15° apresentou instabilidade em praticamente todos os *boards* ensaiados.

As duas válvulas circulares apresentaram pontos com tendência a formação de vórtices, sendo que a válvula de -15° apresentou mais pontos com esta tendência, conforme figura 14.

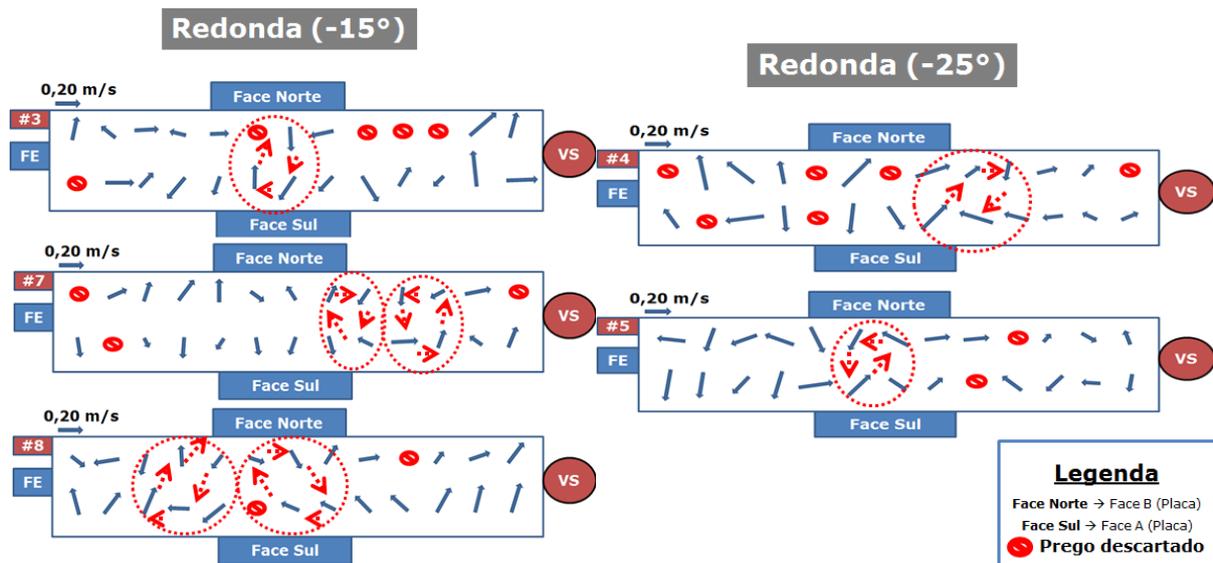


Figura 14 – “Boards” que apresentaram pontos com tendência a formação de vórtices.

Essas formações de vórtices podem ser prejudiciais ao produto, uma vez que esses vórtices podem arrastar inclusões de pó fluxante e causar defeitos no produto final. Cho et al. [12], utilizando simulações físicas e matemáticas testaram a influência do ângulo da porta de saída (-15° e $+15^\circ$) mantendo as demais variáveis constantes. Os autores constataram que a porta de saída com ângulo de -15° apresentou maior velocidade superficial. Os mesmos atribuíram essa conclusão ao fato do ângulo de -15° direcionar o jato primeiramente para face estreita do molde, o que não acontece com ângulo de $+15^\circ$, o mesmo tem tendência a escoar em direção à face larga do molde, diminuindo assim a velocidade superficial. Outro fator observado pelos autores é que o ângulo com direcionamento positivo tem a tendência a apresentar mais vórtices na superfície e maior energia cinética turbulenta. Apesar do trabalho comparar ângulo positivo com negativo, nota-se a mesma tendência no presente trabalho, pois o ângulo com menor inclinação (-15°), para as condições testadas, apresentou maior instabilidade. Assim sendo, uma das alternativas para melhorar a condição de escoamento para essas condições operacionais, é aprofundar estudos focando no ângulo da válvula.

Outro fator relevante é a velocidade superficial reduzida destas duas válvulas circulares, principalmente da circular com ângulo de -15° . Thomas [5] salienta que em casos de velocidades superficiais reduzidas pode ocorrer congelamento parcial do menisco, formando assim marcas de oscilação profundas e ganchos, podendo formar trincas longitudinais. Assim, para essas condições operacionais e utilização

dessas válvulas, outros parâmetros podem ser trabalhados para ajustar a velocidade superficial do menisco. Liu et al. [11] constataram que, à medida que a fração de gás diminui, a velocidade superficial na região do menisco tende a aumentar. Desta forma, para a redução dessa fração de volume, mantendo constante a largura e a profundidade da válvula constante, a alternativa é aumentar a velocidade de lingotamento e/ou reduzir a vazão de argônio.

A válvula oval não mostrou instabilidade e apresentou velocidades superficiais mais elevadas. No entanto, apresentou escoamento do tipo *single roll*. Uma alternativa para alterar para o tipo *double roll*, mantendo a largura e profundidade de válvula constante, é atuar na fração volumétrica de argônio, porém deve-se atentar aos valores de velocidade superficial, pois velocidades muito elevadas podem gerar turbulência e arraste de escória de pó fluxante. Dauby [3] relata que outra razão que justifica o padrão de escoamento ideal ser do tipo *double roll* é o mesmo ter a tendência a apresentar uma distribuição uniforme da camada de escória em todo o molde, e o escoamento do tipo *single roll*, além de potencializar a formação de uma camada de escória não uniforme no molde, o forte escoamento descendente pode prejudicar a flotação de inclusões ascendentes e bolhas de argônio.

3 CONCLUSÃO

O método experimental de “Nail board” foi capaz de distinguir variações de velocidade superficial e padrões de escoamento de cada válvula testada. Com os resultados obtidos, verificou-se que a válvula de saída oval e ângulo de -15° apresentou maior velocidade superficial quando comparada às demais. Entende-se que o fator preponderante para isto é o fato dessa válvula ter porta de saída com área transversal aproximadamente 23% inferior às demais, o que aumenta a velocidade média de escoamento do aço na saída da válvula. A válvula oval apresentou escoamento do tipo “Single Roll”, sem alternância de escoamento entre os “boards”, o que do ponto de vista de escoamento não é ideal. As válvulas circulares apresentaram escoamentos instáveis, com tendência a formação de vórtices, sendo que a válvula circular de -15° apresentou maior instabilidade e menor velocidade superficial, provavelmente pelo fato de, para as condições testadas, o ângulo da válvula não foi suficiente para direcionar o jato para a face estreita e posterior renovação do menisco.

Ajustes no processo podem ser realizados com o intuito de corrigir as velocidades e padrões de escoamento, tais como: aumentar velocidade de lingotamento e/ou reduzir a taxa de injeção de argônio. Entretanto, essas medidas podem acarretar em outras consequências para o escoamento. Portanto, experimentos com outras variáveis de lingotamento (largura, profundidade de imersão de válvula, taxa de injeção de argônio, velocidade de lingotamento) devem ser realizados a fim de se avaliar qual melhor condição para cada válvula submersa, sempre com o intuito de obtenção do melhor padrão de escoamento e conseqüentemente menor formação de defeitos no produto final.

Agradecimentos

Os autores agradecem:

- Suporte financeiro da CAPES/PROEX ao programa de pós-graduação PPGEM/UFMG;
- André Afonso Nascimento pelo auxílio nos ensaios, pelas inúmeras discussões e avaliações acerca deste trabalho;
- Matheus Henrique Gonçalves Rocha de Souza Costa pelo auxílio nos ensaios;
- Hélio Alexandre Alves pela confecção e organização dos “Nail Boards”;
- Alberto Cesar Soares Rodrigues e Caiser Antônio Cunha dos Reis pelo apoio da área de operação;
- Aos gestores Flávio Viana Diniz e Everton Paço Cunha pelo apoio e suporte durante todo o trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 OLIVEIRA, L. J. S. Caracterização de defeito Inclusão de Pó. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, 2013 (Relatório interno de P&D – SSAT número 2594).
- 2 OLIVEIRA, L. J. S. Efeito da Transferência de Calor e do Pó Fluxante na Formação de Trincas Longitudinais. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, 2015 (Relatório interno de P&D – número RPVR011005).
- 3 DAUBY, P. H. Continuous Casting: Make Better Steel and More of It! Revue de Métallurgie, vol.109, n.2, p113-136, 2012.
- 4 DOMGIN, J.-F., DJUREN, U., ASSELBORN, A. Mold Flow Monitoring Solution: An On-Line Tool to Characterize Flows in CC Mould. In: EUROPEAN CONTINUOUS CASTING CONFERENCE, 9, 2017, Vienna. p.469-476.
- 5 THOMAS, B. G. Modeling of Continuous-Casting Defects Related to Mold Fluid Flow. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SCIENCE & TECHNOLOGY OF STEELMAKING, 3, 2005. AIST. Warrendale, 2005. p.847-865.
- 6 LIU, R. Modeling Transient Multiphase Flow and Mold Top Surface Behavior in Steel Continuous Casting. Urbana: College of Illinois at Urbana-Champaign, 2014. (Dissertação, Doutorado de Filosofia em Engenharia Mecânica).
- 7 THOMAS, B.G., YUAN, Q., ZHAO, B., VANKA, S.P. Transient Fluid-Flow Phenomena in the Continuous Steel-Slab Casting Mold and Defect Formation. Journal of Metals – electronic edition. Pittsburgh, dez. 2006.
- 8 RIETOW, T., THOMAS, B. G. Using Nail Board Experiments to Quantify Surface Velocities in the CC Mold. In: AISTECH CONFERENCE PROCEEDINGS, 2008, Pittsburgh. Warrendale: Association for Iron and Steel Technology, 2008. p. 1-11.
- 9 CHO, S. –M., KIM, S. –H., THOMAS, B. G. Transient Fluid Flow during Steady Continuous Casting of Steel Slabs: Part I. Measurements and Modeling of Two-phase Flow. ISIJ International, Tokyo, vol.54, n.4, p.845-854, 2014.
- 10 THOMAS, B. G. Fluid Flow in the Mold. In: CRAMB, A. W. The Making, Shape and Treating of Steel. 11ª Edição. Warrendale: AIST Iron and Steel Technology, 2003, cap. 14, p.1-41.
- 11 LIU, R., SENGUPTA, J., CROSBIE, D., CHUNG, S., TRINH, M., THOMAS, B.G. Measurement of Molten Steel Surface Velocity with SVC and NAIL Dipping During Continuous Casting Process. In: THOMAS, B. G., YURKO, J. A., ZHANG, L. Sensors, Sampling and Simulation for Process Control. 1ª Edição. San Diego: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2011, cap. Liquid Metal Sensing and Online Measurement, p.51-58.
- 12 CHO, S.–M., THOMAS, B.G., LEE, H.–J., KIM, S.–H. Effect of Nozzle Port Angle on Mold Surface. Iron & Steel Technology, p. 76-84, jul. 2017.